

علـــوم

2008

أ. د. همام غصيب

السّندباد الفيزيائيّ ونسبّية آنشتاين

منشورات
وزارة الثقافة

السندباد الفيزيائي
ونسبيّة أينشتاين

مشروع مكتبة الأسرة ومهرجان القراءة للجميع بمبادرة وزارة الثقافة وبرعاية جلالة الملكة رانيا العبدالله المعظمة (حفظها الله).

• السندباد الفيزيائي ونسبيّة آينشتاين
• أ.د. همام غصيب
• الناشر: وزارة الثقافة
عمان - الأردن
شارع وصفي التل
خلف جبري المركزي
ص. ب ٦١٤٠ - عمان
تلفون: ٥٦٩٦٢١٨/ ٥٦٩٩٠٥٤
فاكس: ٥٦٩٦٥٩٨
Email: info@culture.gov.jo

• **الطباعة: مطبعة السفير ٤٦٥٧٠١٥**
• رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية (٣٦٥٣/١٠/٢٠٠٨)

• تصميم الغلاف: يوسف الصرايرة / الأردن

أ.د. همام غصيب

أستاذ الفيزياء النظريّة / الجامعة الأردنيّة
عضو مجمع اللغة العربيّة الأردنيّ

السّندباد الفيزيائيّ ونسبيّة آينشتاين

إهـــــداء

من صميمِ القَلْب

إلى

صاحبِ السُّمُوِّ الملكيِّ الأميرِ الحسن بن طـلال المُعَظَّم
حَفِظَهُ اللّهُ ورعَـاهُ وأعـزَّ جانبَـهُ دوْمـاً

وفـاءً وعِرْفانـاً ومحبّـةً وتَقْـديـراً

المؤلّف

المحتويات

صفحة

■ المُرَبَّعُ الأوّل ٩

الجُزْءُ الأوّل

نَصّ المُحاضَرَة

■ السّندبادُ الفيزيائيّ ونسبيّةُ آينشتايْن ١٣

■ تمدّد الزّمن وانكماش الطّول ١٦

■ هنري پونكاريه وأزمة الفيزياء الرّياضيّة ١٨

■ مفهومُ الأثير وصعودُ نجمِ النّظريّةِ الموْجيّة ٣٠

■ نسبيّةُ آينشتايْن ومبدأُ ثبوتِ سرعةِ الضّوْء ٤٠

■ الزّمكانُ وقياسُ الأزمنة ٤٧

■ الكتلةُ حَلْقةُ وَصْلٍ بين الزّخْمِ والسّرعة ٥١

■ النسبيّةُ الخاصّةُ والنسبيّةُ العامّة ٥٥

الجُزْءُ الثّاني

المَلاحِق

المُلْحَقُ الأوّل(١) : قامُوسُ المُصْطَلَحات (حَسْبَ التّرتيبِ الهِجائيّ الإنْكليزيّ) ٦١

المُلْحَقُ الثّاني(٢) :قامُوسُ المُصْطَلَحات (حَسْبَ التّرتيبِ الهِجائيّ العربيّ) ٦٩

المُلْحَقُ الثّالث(٣) : قامُوسُ الأعْلام (حَسْبَ التّرتيبِ الهِجائيّ الإنْكليزيّ) ٧٧

المُلْحَقُ الرّابِع(٤) : التّرجمةُ الإنْكليزيّةُ الأمينةُ لورقةِ آينشْتايْن المشهورة في النّسْبيّةِ الخاصّة ٨٣

المُلْحَقُ الخامس(٥) :المصادرُ والمراجع ١٠٩

اللوحات

اللّوحات للفنّان الهولنديّ الكبير مُوريتز كورنيليز إيشر Maurits Cornelis Escher (١٨٩٨-١٩٧٢) .
وهي مأخوذةٌ (بأرقامِها وصَفَحاتِها) عن كتاب :

M.C. Escher and J.L. Locher, *The Infinite World of M.C. Escher*
(Abradale Press/ Harry N. Abrams, Inc., New York, 1984).

		الصّفحة
– رقم ١٤٢ ؛ ص ١١٩ : النِّسْبيّة (عام ١٩٥٣)	Relativity (1953)	١٥
– رقم ١٦٧ ؛ ص ١٤٠ : طالع نازل (١٩٦٠)	Ascending and Descending (1960)	١٧
– رقم ١٨٠ ؛ ص ١٤٧ : شلاّل (١٩٦١)	Waterfall (1961)	١٩
– رقم ١٠٨ ؛ ص ٩٤ : المرآةُ السِّحْريّة (١٩٤٦)	Magic Mirror (1946)	٢١
– رقم ١٠٧ ؛ ص ٩٣ : ثلاثُ كُرات-١ (١٩٤٥)	Three Spheres I (1945)	٢٣
– رقم ١٠٩ ؛ ص ٩٤ : ثلاثُ كُرات-٢ (١٩٤٦)	Three Spheres II (1946)	٢٥
– رقم ١١٥ ؛ ص ٩٨ : عالَمٌ آخَرُ (١٩٤٦)	Other World (1946)	٢٧
– رقم ١١٦ ؛ ص ٩٩ : عالَمٌ آخَرُ (١٩٤٧)	Other World (1947)	٢٩
– رقم ١١٨ ؛ ص ١٠٠ : فَوْق وتَحْت (١٩٤٧)	Up and Down (1947)	٣١
– رقم ١١٩ ؛ ص ١٠١ : بلّورة (١٩٤٧)	Crystal (1947)	٣٣
– رقم ١٨٢ ؛ ص ١٤٩ : عُقَد (١٩٦٥)	Knots (1965)	٣٥
– رقم ١٨٣ ؛ ص١٥٠ : عُقَد (١٩٦٦)	Knots (1966)	٣٧
– رقم ١٤٧ ؛ ص ١٢٢ : مُحَدّبٌ ومُقَعّر (١٩٥٥)	Convex and Concave (1955)	٣٩
– رقم ١٤٨ ؛ ص ١٢٣ : تَحْرير (١٩٥٥)	Liberation (1955)	٤١
– رقم ١٥٤ ؛ ص ١٢٨ : قِسْمَة (١٩٥٦)	Division (1956)	٤٤
– رقم ١٦٣ ؛ ص ١٣٦ : النِهايةُ الدّائرةُ -١ (١٩٥٨)	Circle Limit I (1958)	٤٦
– رقم ١٧١ ؛ ص ١٤٣ : النهايةُ الدّائرةُ -٤ (١٩٦٠)	Circle Limit IV (1960)	٤٨
– رقم ١٨١ ؛ ص ١٤٨ : النهايةُ المربّع (١٩٦٤)	Square Limit (1964)	٥٠
– رقم ٨٨ ؛ ص ٧٩ : لَيْلٌ ونهار (١٩٣٨)	Day and Night (1938)	٥٢
– رقم ٩٠ ؛ ص ٨٠ : دَوْرَة (١٩٣٨)	Cycle (1938)	٥٤
– رقم ٩٢ ؛ ص ٨٢ : ماء وسماء -١ (١٩٣٨)	Sky and Water I (1938)	٥٦
– ١٢١ ؛ ص ١٠٢ : قَطْرَةُ نَدَى (١٩٤٨)	Dewdrop (1948)	٥٨

المُرَبّــعُ الأوّل

تُعَدُّ نظريّةُ النّسْبيّةِ الخاصّةِ لألبرْت آينشتايْن مِنْ أعْظَمِ الإنْجازاتِ البَشَريّةِ في كُلّ العُصُور . ولعلّها اجْتَذَبَتْ من الاهتمامِ العِلْميّ والفَلْسَفيّ والثّقافيّ ، وحتّى السّياسيّ ، أكثرَ من معظمِ الإنجازاتِ الفِكْريّةِ السّامقَةِ الأُخرى . وما زالتْ تَبْهَرُنا وتَسْتَفِزُّنا حتّى بَعْدَ كُلّ هذه العُقُودِ الطّوالِ من نَشْرِها عامَ ١٩٠٥ .

وإذْ آمُلُ أنْ أعودَ إليها في كتابٍ مَنْهَجيّ جامع ، فإنّي أرجو أنْ تكونَ الكُرّاسةُ التي بين يَدَيْك مدْخلاً متواضعاً يَحْفِزُك على تَفَكُّه هذا الإنجازِ البَشَريّ الرّفيع ، ومن ثَمّ العَوْدةِ إلى المَظَانّ والمصادرِ . فهدفي التّنويرُ أوّلاً ، والحَثُّ على الرّجُوعِ إلى الجُذُورِ والأُصُولِ ثانياً .

تتكوّنُ هذه الكُرّاسةُ من جُزْأيْن : الأوّل يَشْتَمِلُ على نَصّ المحاضرةِ التي ألقَيْتُها عن نسبيّةِ آينشتايْن في قاعةِ المَرْكَزِ العِلْميّ الثّقافيّ / مؤسّسة عبد الحميد شومان / عمّان يَوْمَ ١٩٨٧/١/٢٤ . وقد نَقّحْتُهُ وهذّبْتُهُ وشذّبْتُه ؛ كما أضَفْتُ إليهِ لوْحاتٍ انتَقَيْتُها بعنايةٍ للفنّانِ الهولنديّ الكبير إيشِر . وهي جُزْءٌ لا يتجزّأ من النّصّ ، فيه رشاقةٌ وعُمْقٌ وعِلْمٌ وفَنّ .

أمّا الجُزْءُ الثّاني فيَضُمُّ خمسةَ ملاحقَ تَدْعَمُ النّصّ الرّئيسيّ وتُعَزّزُه . الأوّل والثّاني : قاموسُ المصطلحاتِ الواردةِ في الجُزْءِ الأوّل . وقد

رتّبْتُ أوّلَ هذيْن المُلْحَقَيْن حَسْبَ الأحْرُف الهِجائيّةِ الإنْكليزيّة ، والثّاني حَسْبَ الأحْرُفِ الهِجائيّةِ العربيّة . والمُلْحَقُ الثّالث : قاموسُ أسماءِ الأعْلام الواردةِ في النّصّ . والرّابع : التّرجمةُ الإنْكليزيّةُ الأمينةُ لورقةِ آينشتايْن الرّئيسيّةِ في هذا المجال . وآمُلُ أنْ أُضيفَ التّرجمةَ العربيّةَ في طَبْعَةٍ لاحقَة . وحتّى ذلك الحين أتركُ تَرْجَمَتَها تمريناً مُفيداً للقاريء . أمّا الملحقُ الخامسُ والأخيرُ فيتكوّن من مَرْجِعيّةٍ (ببْليُوغرافيا) ضَافِيَة ، مَعَ بَعْضِ المراجعِ المختارةِ الأُخرى .

أتمنّى لك - عزيزي القاريء - رحلةً ساحِرةً مَعَ السّنْدبادِ الفيزيائيّ في دُنْيا النّسْبيّةِ الفاتنة .

أ . د . هُمَام غَصِيب
أستاذ الفيزياء النّظريّة/الجامعة الأُردنيّة
عضو مَجْمَعِ اللّغة العربيّة الأُردنيّ

عمّان؛ في ٢٠٠٠/١/١م

الجُزْءُ الأوّل

[نَصّ المُحاضَرَة]

السّندبادُ الفيزيائيّ

ونسْبيّة آينْشتَاين (الخاصّة)

[اللّوْحات لـ : إيشِر]

السِّندبادُ الفيزيائيّ ونسبيّةُ آينشتايْن

نحن موْلعون منذ نعومةِ أظافرنا بمغامرات السّندباد البحريّ الذي عاش في بغداد هارون الرّشيد ، وأحبّ البحرَ والمغامرة ؛ فقام بسبع سفراتٍ كلّها غرائبُ وعجائب ، كما حدّثتْنا تلك الفاتنةُ السّاحرةُ شهرزاد في ألف ليلة وليلة . لكنْ من هو السّندبادُ الفيزيائيّ؟ . . .

السّندبادُ الفيزيائيّ هذا مخلوقٌ نادر لا أقابلُهُ إلاّ في أغرب الأمكنة وأعجب الأزمنة ، ولا أملّ حديثَهُ أو أسأمُ حكاياتِه . هو طيْف وليس بطيْف ؛ حيّ وليس بحيّ . فلمْ يُصادفْني لغزٌ أكبرُ من لغزه ولا أحجيةٌ أعقدُ من أحجيته . وإنّ في حياتنا لحظاتٍ تعنّ حييّةً بين الحُلُم واليَقَظَة ، ويتساوى فيها الواقعُ والخيال . هذه هي اللّحظاتُ التي أقابلُ فيها السّندبادَ الفيزيائي . فأسْتَرِقُ السّمْعَ إلى كلّ كلمة يَنطقُ بها أو همهمةٍ يُهمهمُها . وأحياناً يَرِدُ كلامُهُ مبهماً غامضاً لا أوّلَ له ولا آخر ؛ فلا ألومُ إلا نفسي على مغبّة ضَياعِ دُرَرِ كلامه .

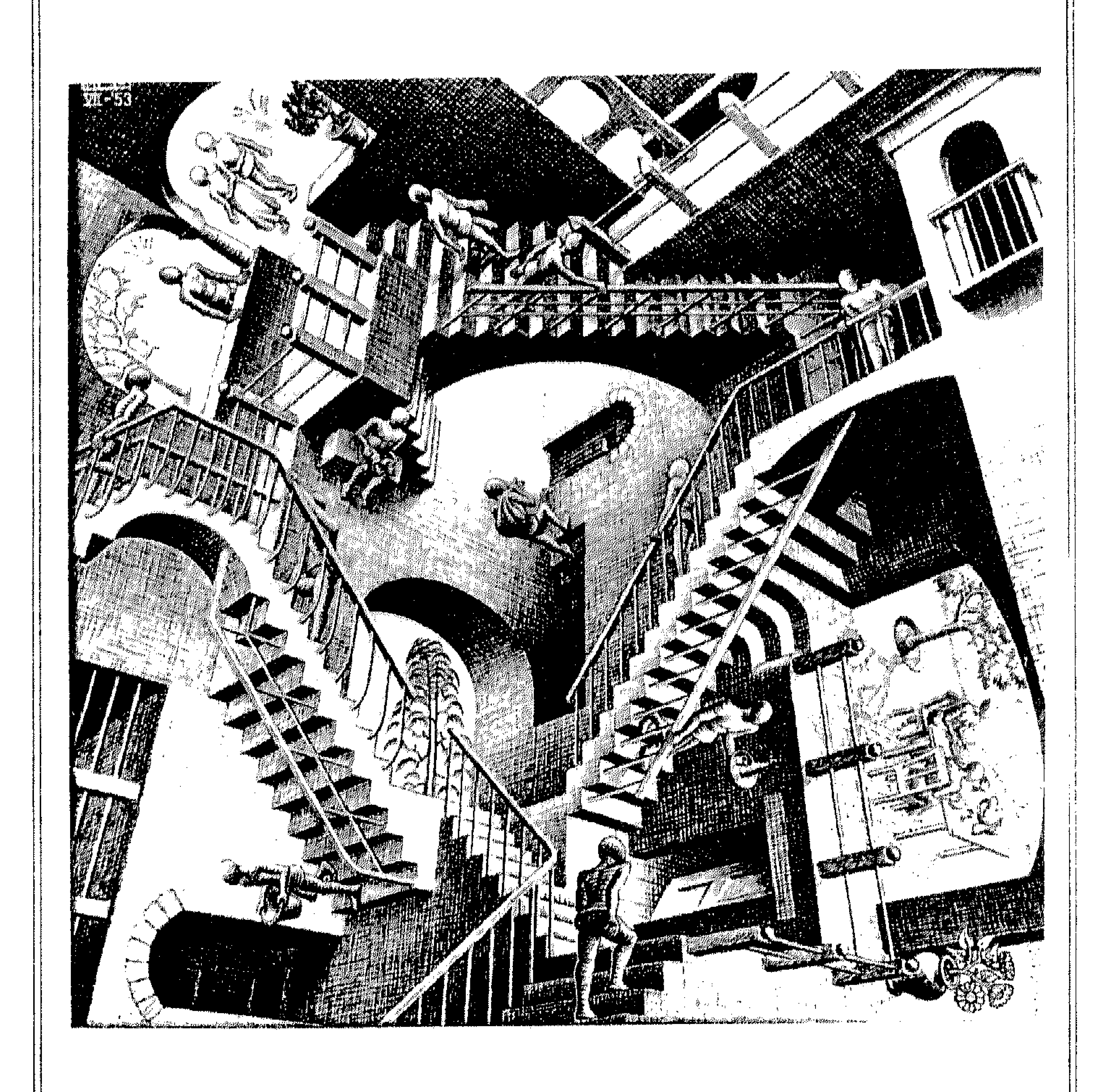
هذا السّندبادُ المفكّرُ الحكيم ، الذي لا يكفّ عن السعي في مناكبِ الأرض والفضاء ، كان يحومُ ببساط الرّيح فوق «هيروشيما» و«ناغازاكي» حين أُلقيتْ عليهما القنبلةُ الانشطاريّة (النّوويّة) ، فانطلقَ الماردُ الجبّارُ من قُمْقُمِه . كذلك لمْ يكنْ بعيداً عن مسرح تجارب القنبلةِ الاندماجيّة (الهيدروجينيّة) . وكم من ليالي السّمر قضاها في شرفتي

برفقةِ أنغامنا الأثيرة ، وهو يتأمّل النّجومَ تدور في أفلاكها وتَشعّ طاقتَها الهائلةَ دون مَلَلٍ أو كَلَل! أتدري ما المبدأ الفيزيائيّ الكامنُ وراء كلّ مظاهر الطّاقةِ هذه . . . طاقةِ القنبلتيْن الجبّارتيْن ، أو طاقةِ الشّمسِ والنّجوم؟ هو مبدأ تكافؤ الكتلة والطّاقة المتمثّل في العَلاقة الجوْهريّة :

الطّاقة (الإجماليّة) = الكتلة × مربّع سرعة الضّوْء ($E=mc^2$) .

وهي العَلاقةُ التي انتهى إليها ألبرت آينشتايْن عام ١٩٠٥ ولمّا يتجاوزْ ربيعَه السّادسَ والعشرين! وقد وردتْ - أوّلَ ما وردتْ - في بحثه الثّاني ضمن ما عرف بنظريّة النّسبيّة الخاصّة ، الذي تسلّمهُ محرّرو الدّوريّة المشهورة «سجلاّت الفيزياء *Annalen der Physik*» في ٢٧ أيلول (سبتمبر) عام ١٩٠٥ . وكانوا قد تلقّوا رائعتَهُ الأولى عن النّسبيّة الخاصّة الموسومة بِـ «في التّحريك الكهربائيّ (الدّيناميكا الكهربائيّة) للأجسام المتحرّكة» قبل ذلك بثلاثة شهور [أي في ٣٠ حَزيران (يونيو) ١٩٠٥] - تلك الرّائعةَ التي شمِلَتْ عشرةَ بنود : أوّل خمسةٍ منها عن علم الحركة (الكينماتيكا) الجديد الذي توصّل إليه والخمسةُ الأخرى عن تطبيقات النّظريّة الجديدة في مجال التّحريك الكهربائيّ .

وكان السّندبادُ الفيزيائيُّ قد قرأ هذا العمل بنَهم شديد كي يفقهَ مدلولاتِ مغامراته الأخيرة ، حين ترك شقيقَهُ التّوأمَ السّندباد البرّيّ على الأرض ، واستقلّ طائرَ الرّخّ العملاقَ الذي سرعان ما حلّق بسرعة تكاد تساوي سرعةَ الضّوْء ، مُيمّماً شطرَ أحد النّجوم التي تبعد عنا عدداً من



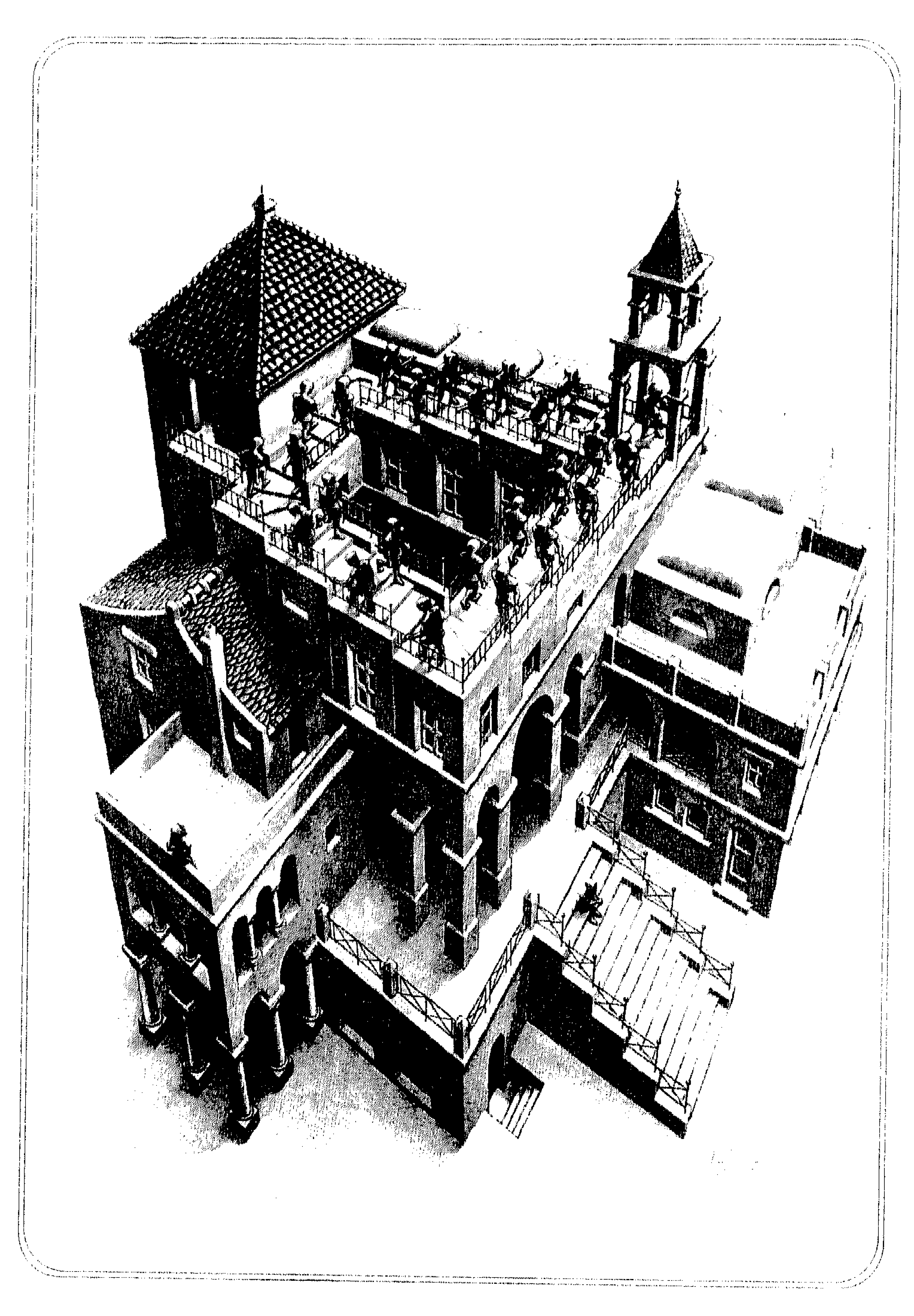
Relativity (1953) النّسْبيّة (عام ١٩٥٣)

Lithograph, 272x293 (10¾ x 11½")

السّنين الضّوْئيّة . وقبل أنْ أقصّ عليكم ما حدث ، دعني أذكّركم بأنّ الضّوْءَ في الفراغ ينتشرُ بسرعة ٣٠٠ ألف كم/ ثانية (أو ١٨٦,٢٨١ ميلاً في الثّانية) ؛ أي عندما يدقّ قلبُك دقّةً واحدة تقريباً وتتحرّك الأرض مسافة ٣٠ كم في دورانها حول الشمس ، يكون الضّوءُ قد قطع مسافةً تعادلُ سبعة أضعاف محيط الأرض . والمدهش أنّ سرعةَ الضّوء هذه في الفراغ - تلك السّرعةَ الهائلةَ لكن المحدودة - تتّسمُ بثبوتٍ قاطع ؛ فلا يمكن تسريعُ الضّوء في الفراغ أو إبطاؤه ، بخلاف الجُسَيْماتِ الماديّة . صحيح أنّ سرعتَهُ تقلّ عند نفاذه في وسطٍ ماديّ ؛ لكنّه يُعاودُ الانتشارَ بالسّرعة السّابقة بمجرّد خروجِهِ للفراغ . أمّا السّنة الضّوئيّة فهي المسافةُ التي يقطعُها شعاعُ الضّوء في سنة [أرضيّة] واحدة ، وتساوي ٩٤٦×١٠^١٠ (أي ٩٤٦ وعشرة أصفار إلى يمينها) كم . وهذه مسافة صغيرة نسبيّاً بلغة المقاييس الفلكيّة . ونحن إذْ نسبرُ غوْرُ الفضاء السّحيق إنّما نعود إلى الماضي ؛ فحينما ننظرُ إلى نجم يبعد عنّا مئةَ سنةٍ ضوْئيّة ، نراه كما كان قبل مئةِ سنة .

□ تمدّد الزّمن وانكماش الطّول

لنعدْ إلى السّندباديْن التّوأميْن . فبعد جولتِه الفضائيّةِ التي استغرقتْ سنةً واحدةً حسْبَ توقيتِه ، عاد السّندبادُ الفيزيائيّ إلى الأرض ليجد شقيقَهُ التّوْأمَ قد أضحى شيخاً طاعناً في السّنّ ؛ في حين



Ascending and Descending (1960)　　طالع نازِل (١٩٦٠)

Lithograph, 350 X 285 (13$^{3}/_{4}$ X 11$^{1}/_{4}$")

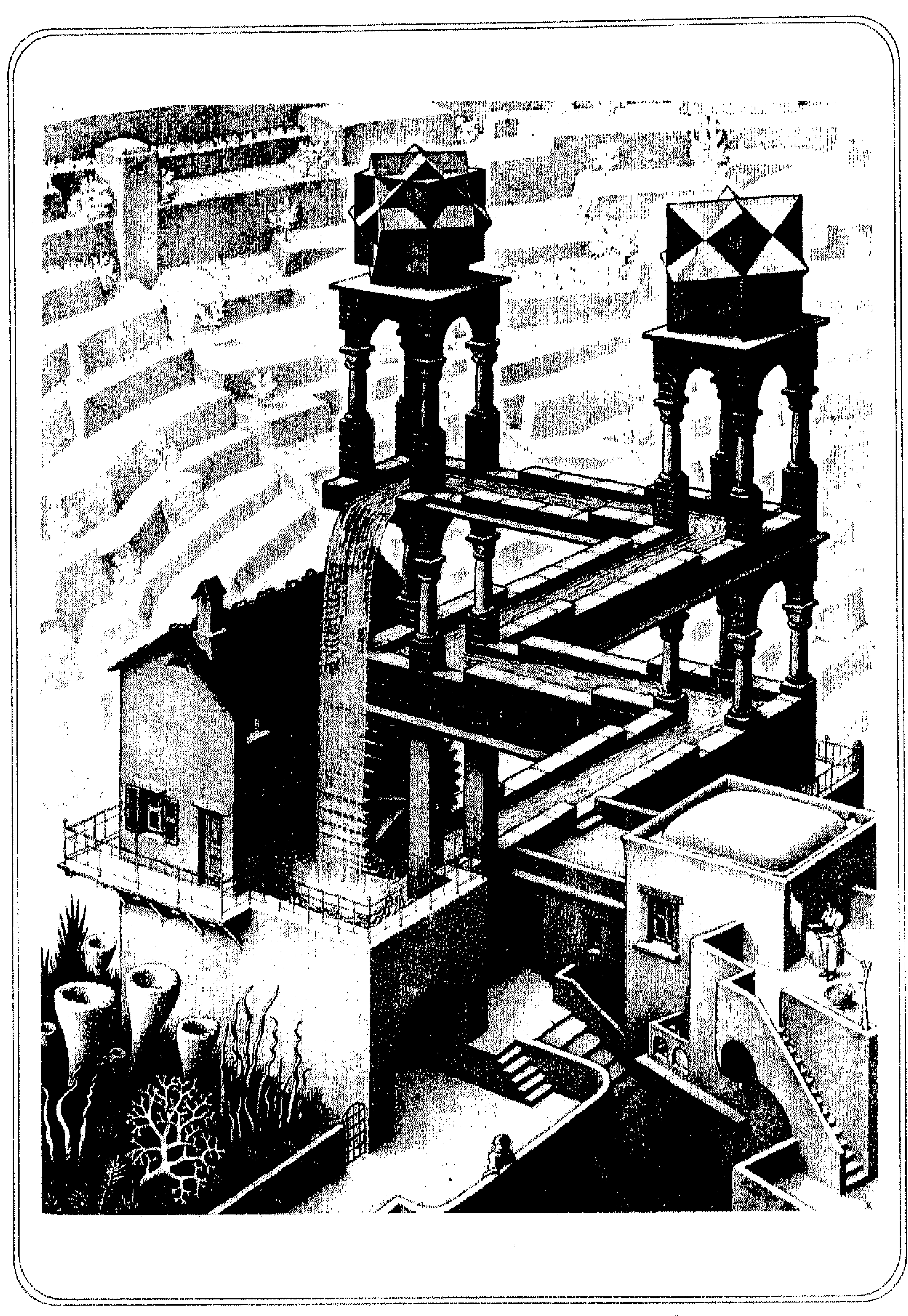
أنّه لا يزال هو شاباً يافعاً، وكأن الزّمانَ كالنّابض (الزّنبرك) الذي تمدّد (أو أبطأ) بالنّسبةِ إلى شقيقِه. ولمْ ينسَ - في أثناء سفرِه - أنْ يلاحظَ أنّ المسافاتِ والأطوالَ تنكمشُ من وِجهةِ نظره!

فما هذا الذي نسمعُهُ عن تمدّد الزّمن وانكماشِ الطّول؟ وما ذاك الذي سمعناه سابقاً عن تكافؤ الكتلة والطّاقة؟ لا غرْوَ أنّ النّسبيّةَ ما زالت تثيرُ الرّعبَ والهلعَ في نفوس طلاّبِها، رُغْمَ انقضاء خمسةٍ وتسعين عاماً على ميلادِها؛ ناهيك عن المثقّف العاديّ الذي يخالُها ضَرْباً من الطّلاسم والرّموز الهيروغليفيّة... مَعَ أنّها مثالٌ نادرٌ على الوضوح والبساطة والسّهْلِ الممتنع، وعلى الاقتصادِ في التّفكير والتّعبير! وهذا ما سأحاولُ أن أبيّنَهُ في الصّفحاتِ القليلةِ القادمة.

☐ هنري پونكاريه وأزمة الفيزياء الرّياضيّة

لنعدْ مَعَ السّندباد الفيزيائيّ - بآلته الزّمنيّةِ الخاصّة - إلى عام ١٩٠٤. ففي ذلك العام، ألقى الرّياضيّ الفرنسيّ اللاّمعُ هنري پونكاريه محاضرةً رائعةً أمام جمهورٍ متعطّش للمعرفة العلميّة (تماماً مثل جمهوري اليوم)، حلّل فيها ببصيرةٍ ثاقبة ما دعاه «الأزمة الحاليّة في الفيزياء الرّياضيّة».

فبيّنَ كيف أصبحت المبادىء الفيزيائيّة مهدّدةً بالانهيار نتيجةً لعَجْزها عن تفسير الاكتشافات المستجِدّةِ آنذاك أو استيعابِها. فمثلاً،



Waterfall (1961) شلاّل (١٩٦١)

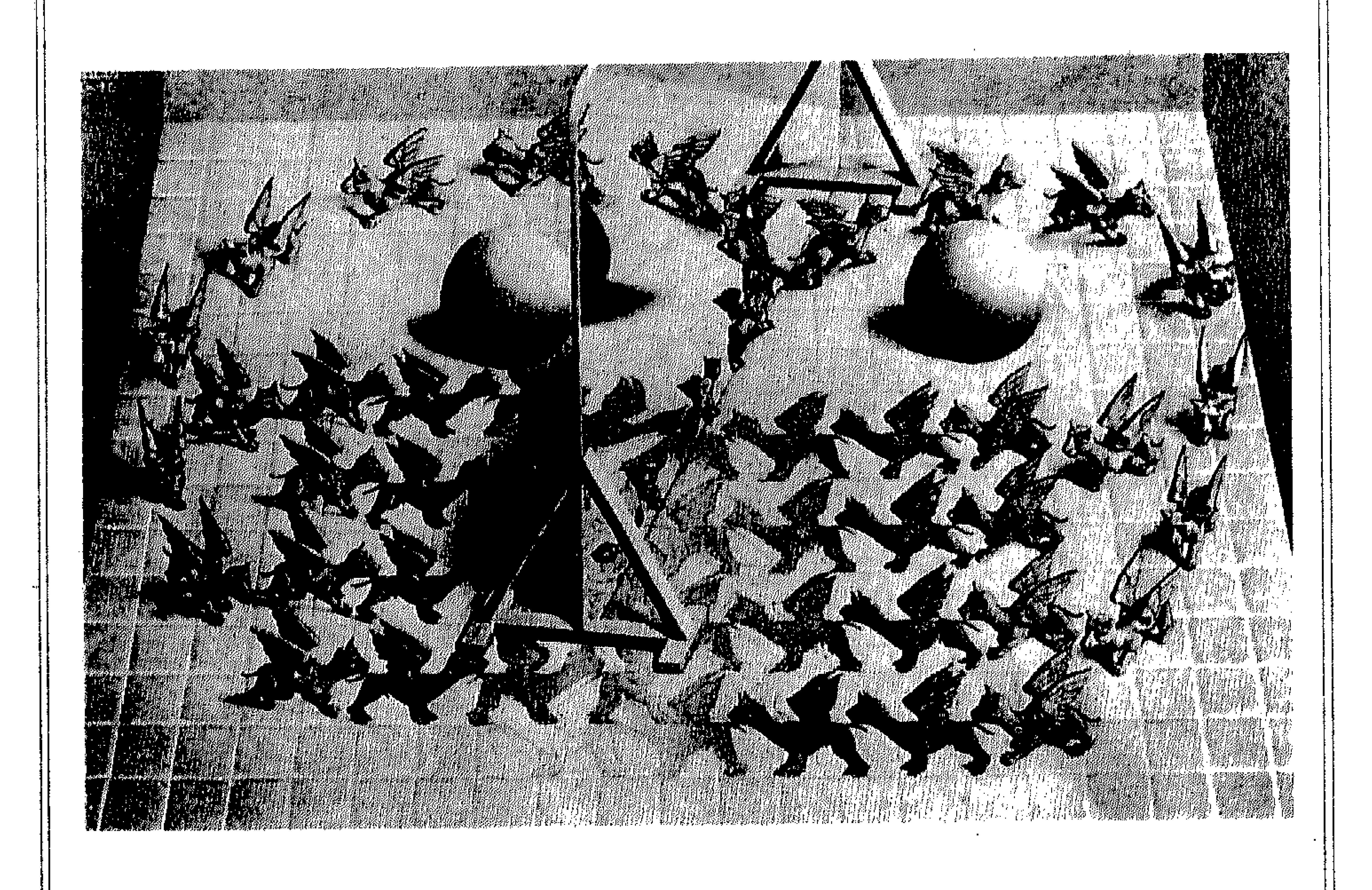
Lithograph, 378 x 300 ($14^7/_8$ x $11^3/_4$")

كـانت ثمّـة أزمـةُ الميكانيكا التّقليـديّة أو الكلاسـيكيّـة (النّيـوتُنيّـة) والتّحريك الكهربائيّ للأجسام المتحركة ومبدأ حفظ الكتلة [لافوازييه] ومبدأ حفظ الطّاقة [هلمْهُولتز ومايِر وجول] . هاكم بعضَ ما ذكرَهُ في هذا الصّدد :

«وربّما اضطررنا إلى أنْ نقومَ ببناء ميكانيكا جديدة لم نقمْ [بعد] بغير استشفافِها . . . ميكانيكا يتصاعدُ فيها القصورُ مع السّرعة وتصل فيها سرعة الضّوء حداً لا يمكن تجاوزُه . أما الميكانيكا المألوفة ، وهي الأكثرُ بساطة ، فقد تبقى مجرّدَ تقريبٍ أوّليّ ، لأنها ستكون صحيحةً بالنسبة لسرعات لا تكون كبيرةً جداً .»

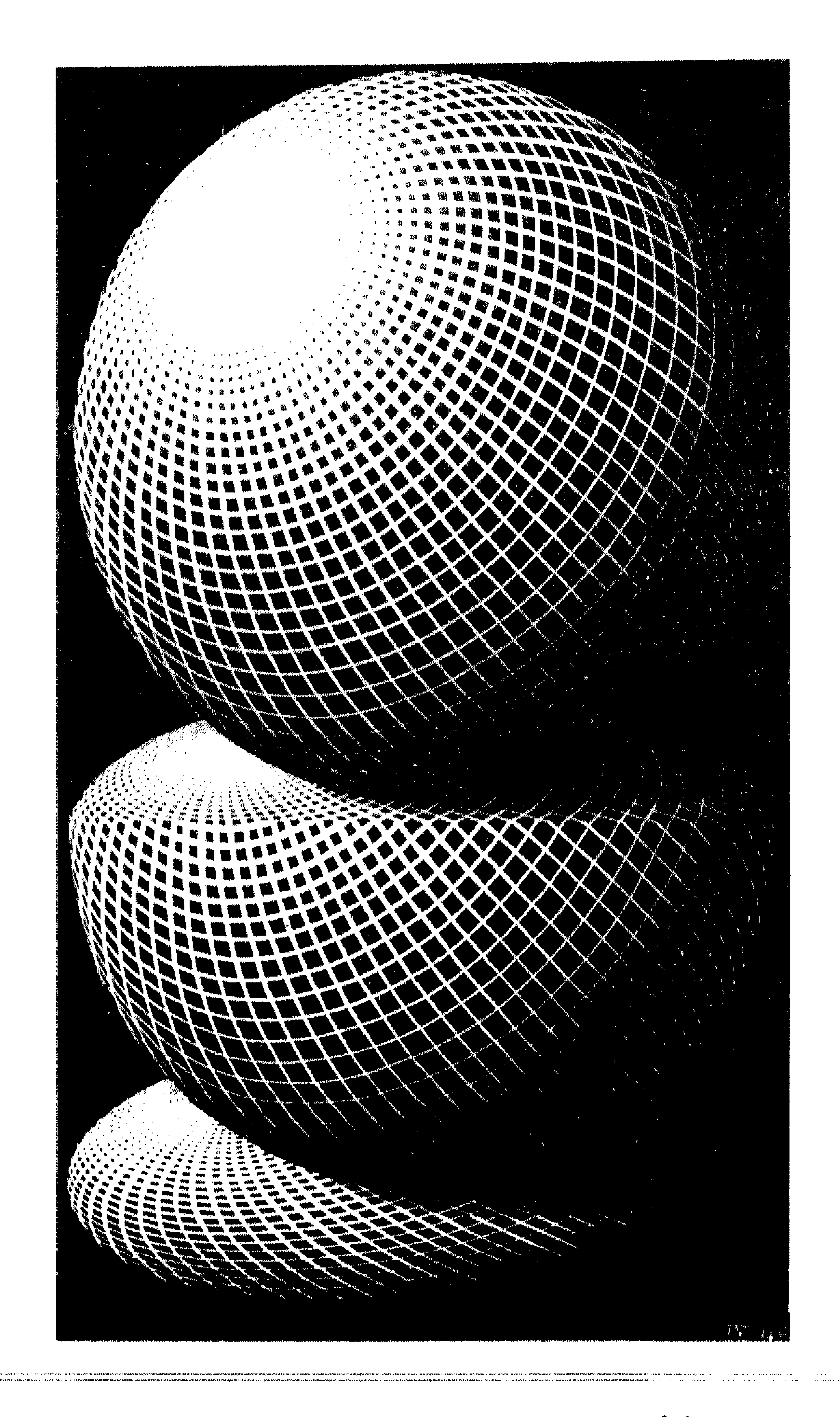
«يجب - قبل كلّ شيء - أنْ نحصلَ على نظريّةٍ أكثرَ إرضاءً حول التّحريك الكهربائيّ (الدّيناميكا الكهربائيّة) للأجسام المتحرّكة ؛ فلقد بيّنْتُ بما فيه الكفاية من قبل أنّ الصّعوباتِ تتراكمُ هنا على وجه الخصوص . وقد تمّ تكديسُ الفرضيّات بلا جدوى ؛ إذ لا يمكنُ استيفاءُ كلّ المبادىء في وقت واحد ؛ فلم يُتَوَصّلْ حتّى الآن إلى المحافظة على بعضها إلا بالتّضحيةِ بالبعض الآخر . غيْرَ أنّ الأملَ في الحصول على نتائجَ مشرّفةٍ لمْ يضعْ بعد . فلنأخذْ نظريّة «لورنتز» ، ولنقلّبْها على كلّ الوجوه ، ولنعدلْها شيئاً فشيئاً ؛ فربّما تحلُّ كلّ المشكلات .»

« إنّ الجميعَ يذكرُ هذا الحادثَ الذي كانت له أكبرُ الأصداء . فمنذ أعمال «بكريل» ، خصوصاً حين اكتشفَ بيير كوري وزوجتُهُ الرّاديوم ، لوحظ أنّ كلّ جسم مشعّ يكوّن منبعَ إشعاع لا يَنْضُب . . . . وفي هذا



مساسٌ بالمبادىء . فقد كانت تلك الإشعاعاتُ طاقةً بالفعل ، وكانت تخرج من قطعة الراديوم نفسِها ، وتخرج دائماً بلا انقطاع . لكنّ هذه الكمّيّاتِ من الطّاقة كانت من الوهن بحيث لا تقبل القياس ؛ أو ، على الأقل ، هذا ما كان يُعْتقد ؛ لذلك لمْ تسبّب كبيرَ إزعاج . غير أنّ المشهدَ ما لبث أن تغيّر حين انتبهَ كوري إلى فكرة وضع الراديوم داخلَ مِسْعَر . آنئذٍ لوحظَ أنّ كمّيّةَ الطّاقةِ التي تنتج باستمرار كمّيّةٌ كبيرة جدّاً . . .» .

. . نحن نعرفُ الآن أنّ الحلّ النّاجعَ لجميع هذه المعضلات التي أشار إليها پونكاريه بشيء من التحسّر والارتباك إنّما كان على قاب قوسين أو أدنى ؛ فقد انجلى الخطْبُ مرّةً واحدة على يد نسبيّة آينشتايْن بعد أقلَّ من عام واحد فقط من إلقاء پونكاريه محاضرتَه المثيرة . وغنيّ عن القول إنّ معضلاتٍ أخرى كانت تُهيْمن على أذهان جهابذة الفيزياء آنذاك ، خصوصاً في القطاع الجهريّ من الكون . ولمْ تجدْ هذه حلولَها المقنعةَ إلاّ على يد الثّورة الفيزيائيّة الثّانية في قرننا الحاليّ ؛ أعني ميكانيكا الكمّ . لكنّ هذه ليست قصّتَنا السّاعة . فلنعدْ ، إذاً ، إلى النّسبيّة ، ولنسألْ : كيف نشأت تلك المعضلاتُ التي لخّصَها پونكاريه ببلاغةٍ نادرة؟ وماذا حدثَ بالضّبط حتّى يشعرَ الفكرُ الفيزيائيّ بذلك الحَرَج - بل الاختناق - في الحقبةِ المربكة التي سبقت عصرَ النّسبيّة الخاصّة؟ ولِمَ أُشيرُ المرّة تلو المرّة إلى النّسبيّة «الخاصّة» (أو «المقيّدة» ، كما كان آينشتايْن يدعوها أحياناً)؟ هل ثمّة نسبيّة عامّة؟ وما معنى هذا؟ أين وَعْدُ «البساطة والسّهولة الممتنعة» الذي قطعتُهُ قبل قليل؟ . . .

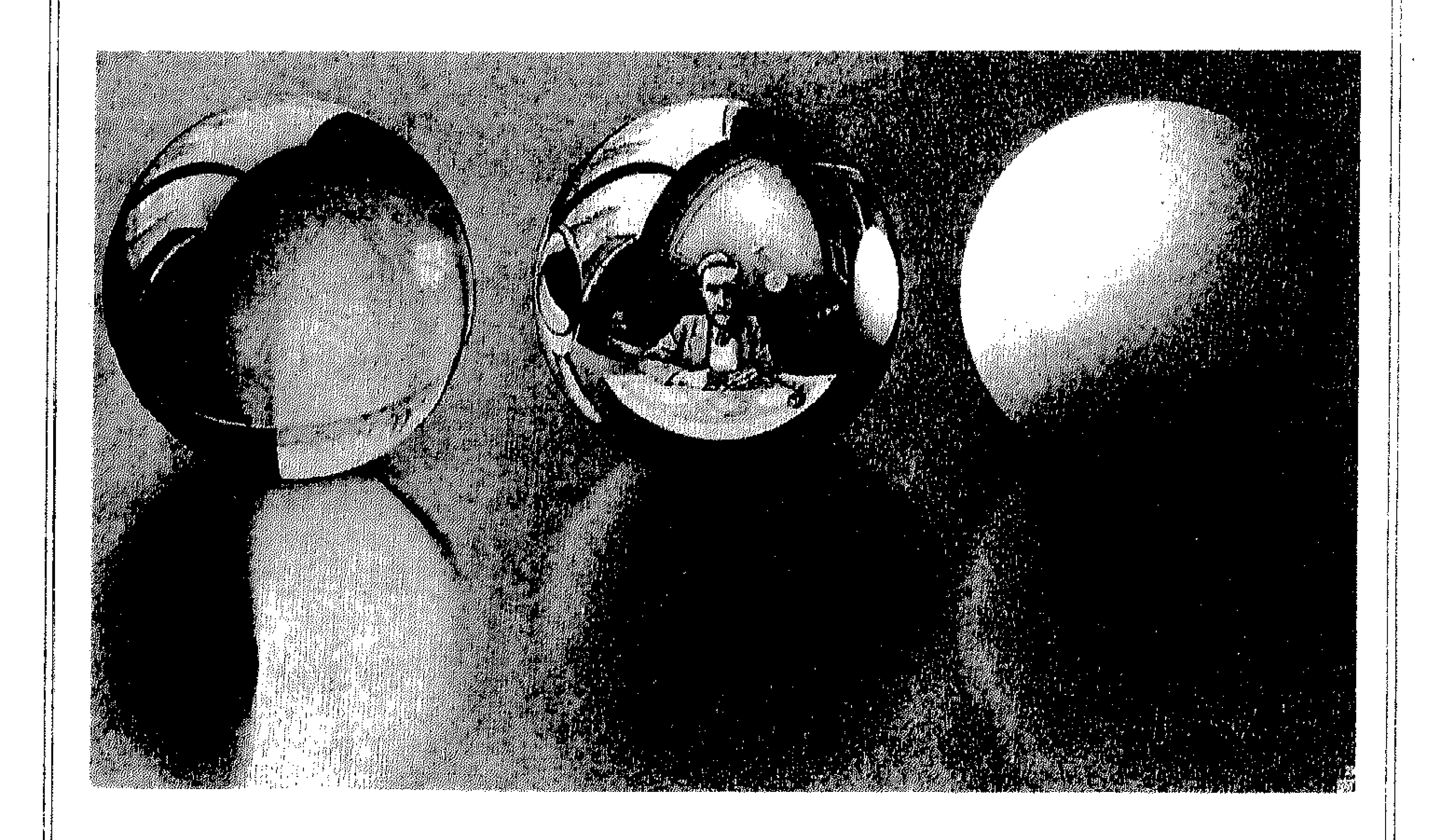


Three Spheres I (1945) ثلاثُ كُرات-١ (١٩٤٥)

Wood engraving, 279 X 168 (11 X 6$^{5}/_{8}$")

إنّ الإجابةَ الشّافيةَ عن كلّ هذه التساؤلات إنّما تقتضي العوْدةَ - بآلة السّندباد الزّمنيّة - إلى عصر غاليليو العظيم؛ وبالتّحديد عام ١٦٣٢ ... تلك السنّة الحاسمة التي نشر فيها كتابَه الشّامخ «**حوار حول النّظاميْن الكونيّيْن الرّئيسيّيْن**»؛ وفيه دافعَ عن النّظام الكوبرنيكيّ ضدّ النّظام البَطْلَمْيُوسيّ. (أمّا عَلاقة تراثنا العربيّ الإسلاميّ بهذا كلّه فهي قضيّة جديرة بالاهتمام ولا تزال غيْرَ مكتمِلة.) ففي فِقْرات مشهورةٍ من هذا الكتاب، تطرّق غاليليو إلى ما قد يحدثُ لظواهرَ طبيعيّةٍ متباينةٍ على متْنِ سفينة تمخرُ عبابَ البحر بسرعة منتظِمة [نسبةً إلى اليابسة]. فانتهى إلى النّتيجة أنّ القوانينَ الميكانيكيّة التي تمتثلُ لها تلك الظّواهرُ تبقى هي هي، سواء أكانت السفينةُ ساكنةً أم متحرّكةً بسرعة منتظِمة (أياً كانت هذه السّرعة)؛ بل إنّه ليس بمقدورنا البتّة أنْ نجزمَ من دراسة هذه القوانين فيما إذا كانت السّفينة متحركةً أم لا. ومن باب التّدليل، فقد ذكر غاليليو مَثَلَ الصّخرةِ التي تسقطُ من قمّة صاري السّفينة. فسواء كانت السّفينة ساكنةً أو في حركة منتظِمة، فإنّ الصّخرةَ تحطّ دائماً عند سفح الصّاري تماماً. بعبارة أدقّ: إنّ المسارَ المقاس للصّخرةِ السّاقطة، في الإطار المَرْجِعِيّ الذي تسقط فيه من السّكون، هو دائماً خطٌّ مستقيم رأسيّ، بصَرْف النّظر عمّا إذا كان ذلك الإطارُ ثابتاً أو متحركاً بسرعةٍ منتظِمةٍ نسبةً إلى الأرض.

لاحظوا هنا مَرْبِطَ الفرَس، كما يقولون: ثمّةَ قانون طبيعيّ محدّد (هو قانونُ السّقوط الحُرّ)؛ وهو يبقى واحداً في جميع الأطر المرجعيّة



Three Spheres II (1946) ثلاثُ كُرات-٢ (١٩٤٦)

Lithograph, 260 X 464 (10¼ X 18¼")

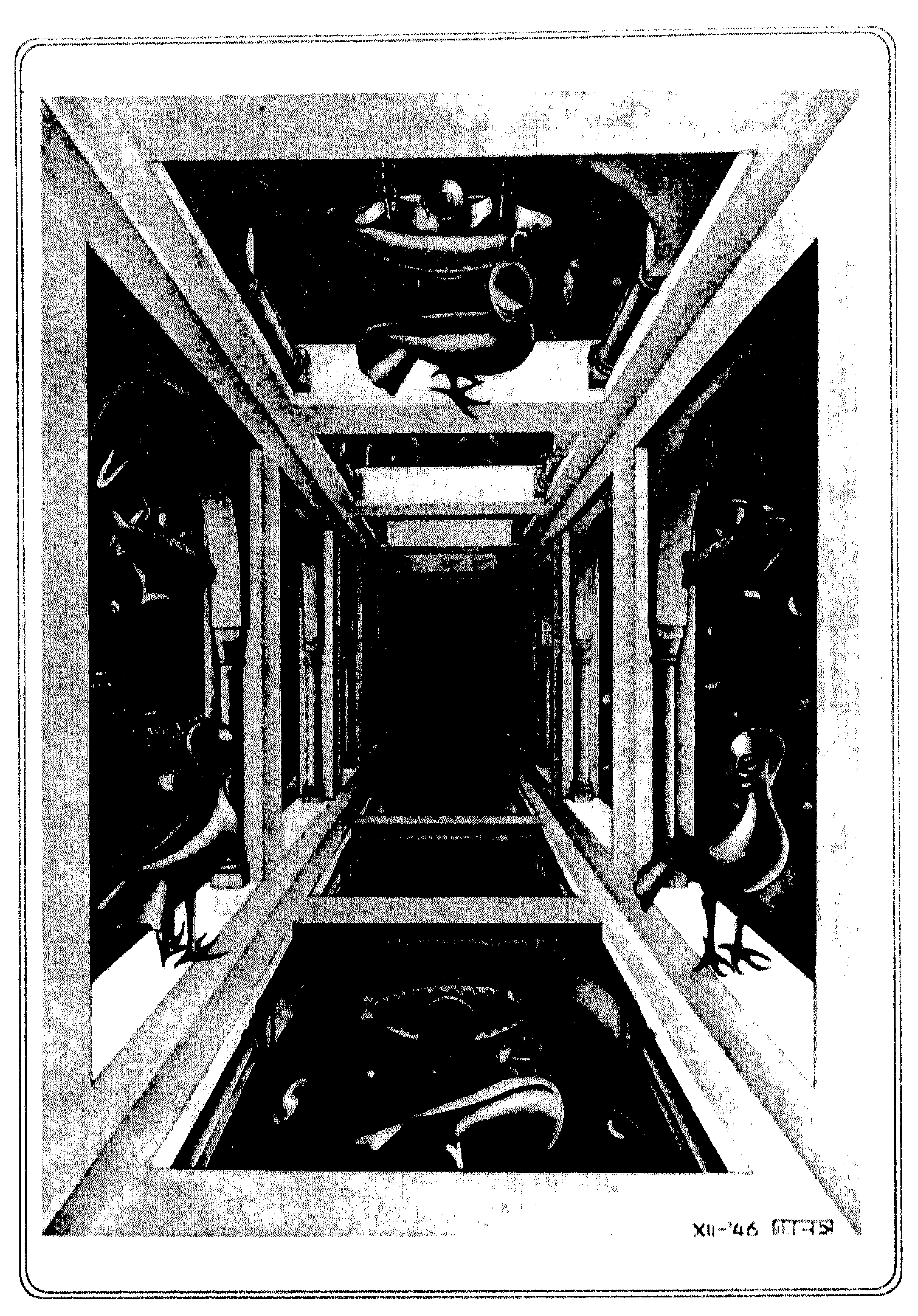
التي تختلِف عن بعضها بعضاً فقط بسرعة ثابتة . وهذا بالضّبط مبدأ النّسبيّة الغاليليّة . وقد تقبّله رينيه ديكارت ، الفيلسوفُ الفرنسيّ الكبير ومؤسّسُ الهندسة التحليليّة ، ولو أنّه أحاطَهُ بكثير من التّمويه الكلاميّ .

أمّا نيوتن - ذلك العملاقُ الأشمّ - فقد خصّص لهذا المبدأ عبارةً واحدةً فقط في كتابه الخالد «المبادئ (الأصول) *Principia*» هذا نصّها :

«تكون الحركاتُ النّسبيّة لجسميْن في مكان (أو فضاء) محدّد متماثلة ، سواء كان هذا المكانُ ساكناً أو متحركاً بانتظام في خطّ مستقيم لا تشوبُهُ حركة دائريّة» .

إذاً ، فقد اعتقد نيوتن بصحّة مبدأ النّسبيّة . بَيْدَ أنّ معضلةَ النّسبيّة في واقع الأمر لم تكنْ محوراً رئيسيًا من محاور اهتمامِه ، وإنّما كان شغلُهُ الشّاغلُ أنْ يُبرهنَ أنّ الحركاتِ الدائريّةَ كانت مطلقة . والأهمّ من هذا وذاك أنّه أدخل أيضاً - إضافةً إلى فكرة المكان المطلق الذي «يبقى دائماً متماثلاً ومستقرًا» ، على حدّ تعبيرِه - مفهومَ الزّمان «المطلق والحقيقيّ والرّياضيّ الذي ينسابُ بانتظام دونما ارتباط بأيّ شيء خارجيّ» .

لنعدْ ثانيةً إلى مَثل الصّخرة السّاقطة سقوطاً حرًا على متن سفينة تتحرّك بسرعةٍ منتظِمة نسبةً إلى اليابسة . هَبْ أنّ مراقِباً واقفاً على الشاطىء يرقبُ هذا الحَدَث . . . حَدَثَ السّقوط الحُرّ للصّخرة . فماذا يرى؟ يرى أنّ مسارَ الصّخرة يكون قِطْعاً مكافئاً . لكنّ القوانينَ الميكانيكيّة (وتحديداً ، قانون نيوتن الثّاني) تبقى واحدةً في كلا



Other World (1946) عالمٌ آخَرٌ (١٩٤٦)

Mezzotint, 218 X 161 ($8^5/_8$ X $6^3/_8$")

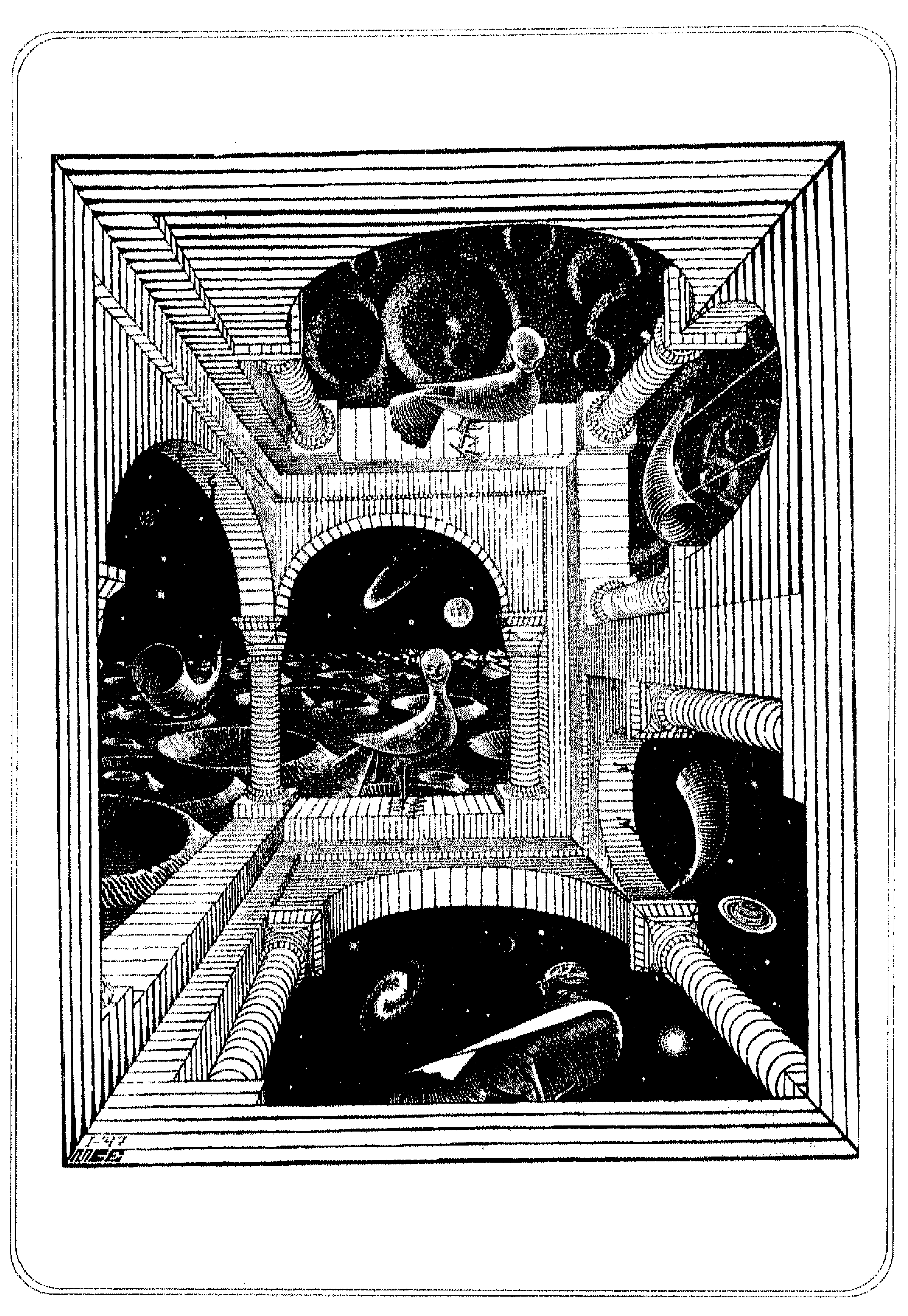
الإطارَيْن . . . إطارِ السّفينة وإطار اليابسة . مِثْلُ هذه الأطر المرجعيّةِ التي تتحرّكُ بسرعةٍ منتظِمةٍ نسبةً إلى بعضها بعضاً تدعى أُطراً قصوريّة ، لأنّ مبدأ القصور لغاليليو (أي قانون نيوتن الأوّل) يكون ساري المفعول فيها .

ثمّة عددٌ من النّقاط المهمّة في هذا السّياق التي تحتاج إلى وِقفة تأمّل خاصّة :

[١] نحن لا نعرفُ أيّ قاعدة لإيجاد إطار قصوريّ . لكنْ إذا أُعطينا واحداً من هذه الأطر ، فإنّنا نستطيع إيجادَ عددٍ لامتناهٍ منها ؛ إذْ إنّ كلّ الأنظمةِ الإحداثيّةِ التي تتحرّك بانتظام نسبةً إلى بعضها بعضاً تكون أُطراً قصوريّةً إذا كان أحدُها كذلك .

[٢] إنّ الزّمنَ في الميكانيكا النّيوتُنيّة مُطْلَق ؛ أي أنّ ثمّة « ساعة كوْنيّة» وَفْقاً لتلك الميكانيكا ؛ بمعنى أنّ الزمنَ المطابق لَحَدَثٍ ما هو نفسُهُ في كلّ الأنظمةِ الإحداثيّة . أمّا الإحداثيّات (أي المواضع) والسّرعات فتكون مختلِفة ، وهي ترتبط ببعضها بعضاً عن طريق معادلات تحويليّة تدعى الغاليليّة .

[٣] مَعَ أنّ الإحداثيّاتِ والسّرعاتِ تختلِفُ من إطار لآخر ، فإنّ التّسارعَ والقوّة ، وبالتّالي قوانين الميكانيكا ، تبقى لامتغيّرةً بالنّسبة إلى



Other World (1947) عالمٌ آخرٌ (١٩٤٧)

Wood engraving in three colors, 317 X 260 ($12^{1}/_{2}$ X $10^{1}/_{4}$")

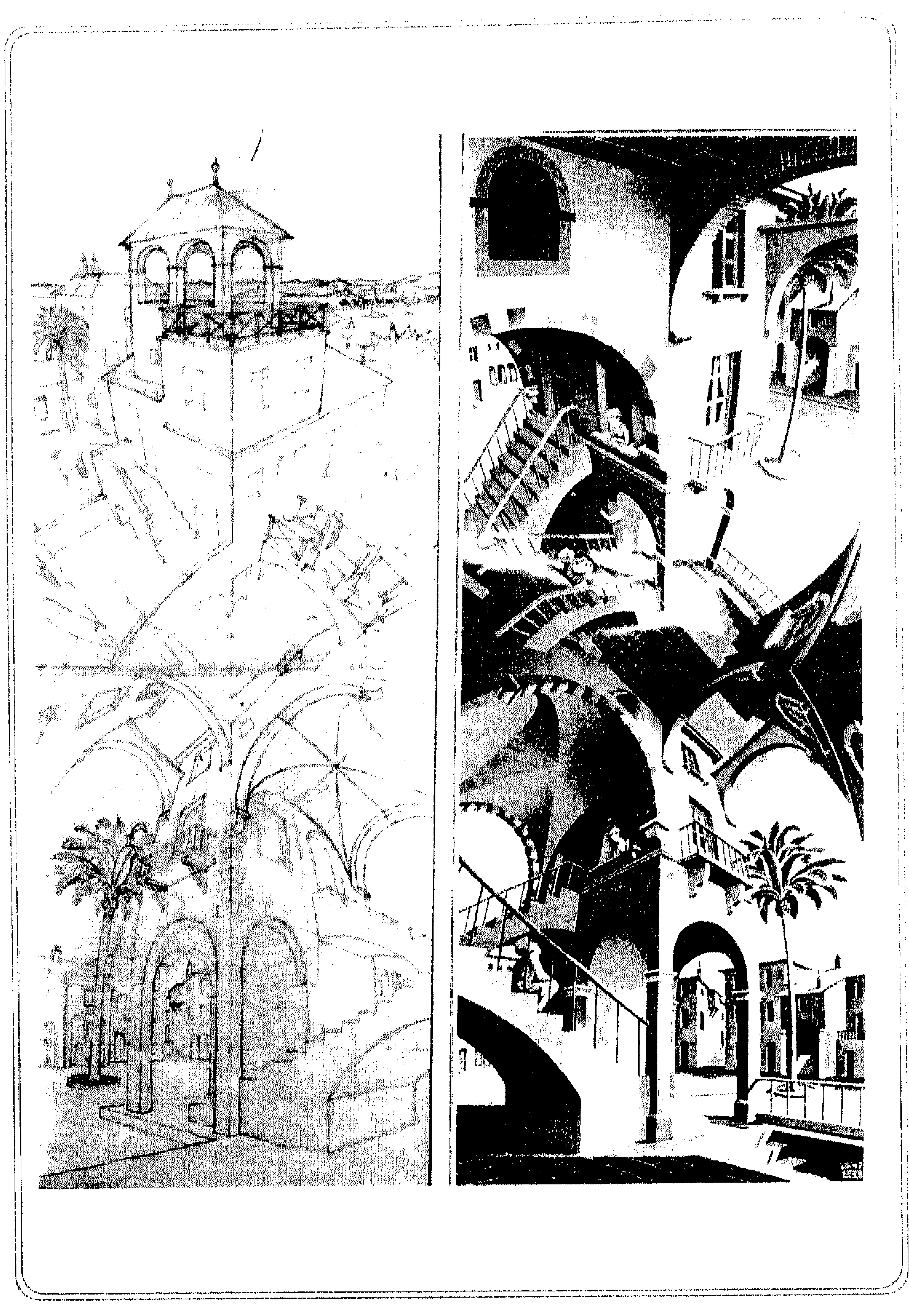
قوانين التّحويل .

... قُصارى القول ، إذاً ، أنّ مبدأ النّسْبيّةِ الغاليليّة (أو الكلاسيكيّة) إنّما يسري على الظّواهر الميكانيكيّة ، وهو ينصّ على ثبوتِ قوانين الميكانيكا في الأطر القصوريّة كافّة . . . السّؤال يطرحُ نفسَهُ الآن : هل يسري هذا المبدأ على الظّواهر غيرْ الميكانيكيّة أيضاً ، خصوصاً تلك التي ينهضُ فيها «المجال» بدوْرٍ حيويّ؟ إنّ الإجابةَ عن هذا السّؤال لَتُمثّلُ قصّةً أخرى ممتِعةً أيّما إمتاع .

☐ مفهومُ الأثير وصعودُ نجمِ النّظريّةِ الموْجيّة

يكمنُ أصلُ هذه القصّة - حسْبَ علمي - ضمن إطار التّصوّر الميكانيكيّ للكوْن الذي ابتدعَهُ خيالُ ديكارت قبل ثلاثة قرون ونصْف . فَوَفْقاً لديكارت : «كلّ أجسام الكوْن المرئيّ إنما تتكوّن من ثلاثةِ أشكال للمادّة ، أشبه بالعناصر الثّلاثةِ المميّزة» . . . مادّةِ الشّمس والنجوم الثّابتة ، ومادّةِ الفضاء ما بين المجرّات ، ومادّة الأرض والكواكب والمذنّبات . أمّا مادّة الشكل الثّاني ، فهي - على حدّ تعبير ديكارت - «تنقلُ الضّوْء عَبْرَ الفضاء ما بين المجرات» .

لقد أُطلق على هذا الوسَط الذي يعمرُ الفضاء اسمُ «الأثير» أو



Up and Down (1947) فَوْق وتَحْت (١٩٤٧)

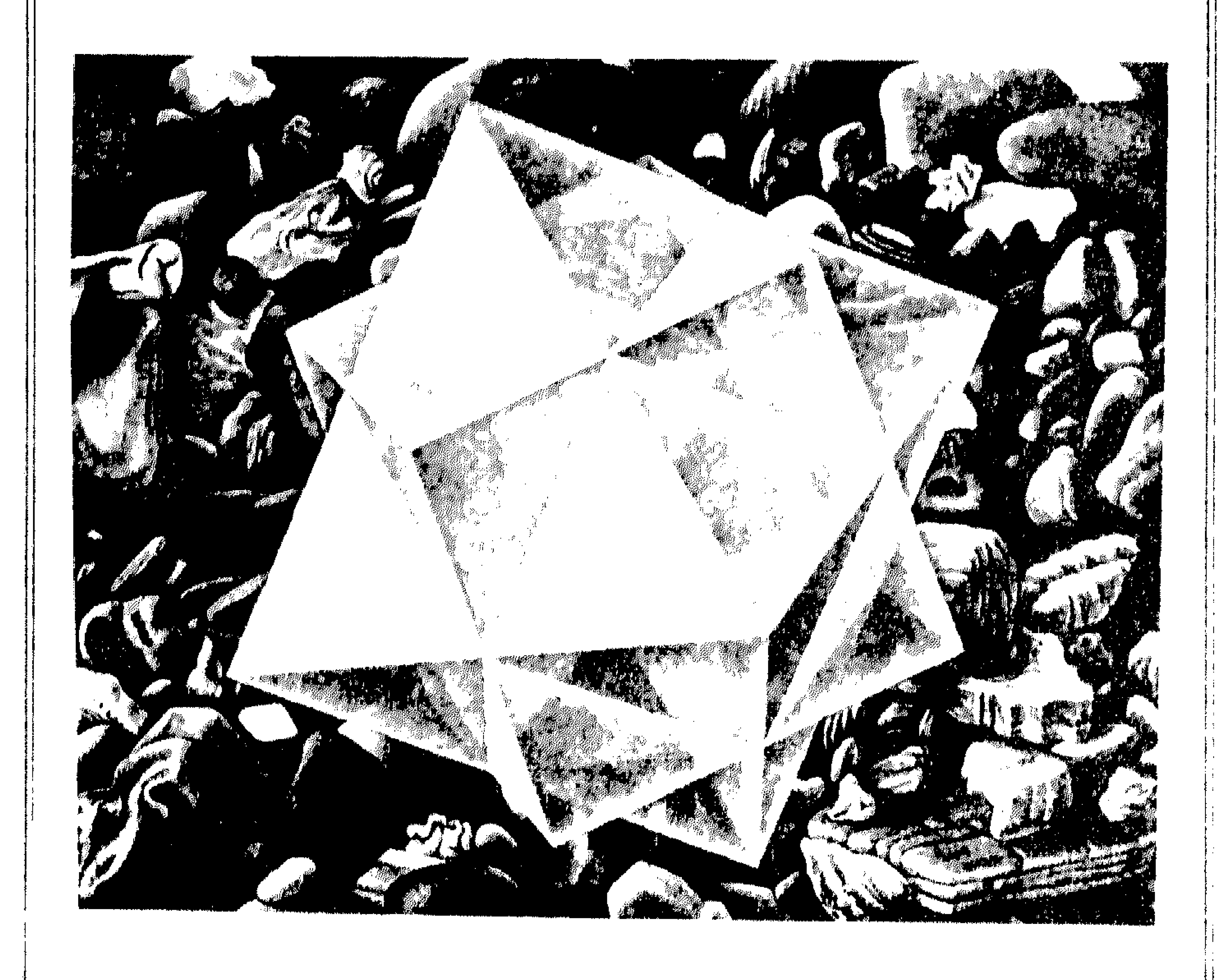
Lithograph, 505 X 205 ($19^{7}/_{8}$ X $8^{1}/_{8}$")

«الأثير الضّوئيّ» أو «الأثير الكوْنيّ» [وهو مصطلح مستعار من العلم الإغريقيّ الذي أناط بالأثير مهمّةَ مَلء المناطق السّماويّة ؛ فكان – إن شئتم – عنصراً خامساً ، إضافة إلى الثّرى والماء والهواء والنّار] . وأمسى وجودُهُ ضرورةً فيزيائيّةً في سياق النّظريّة الموْجيّة للضّوء ، التي يبدو أنّها بزغتْ – أوّلَ ما بزغتْ – في كتاب «تنقيح المناظر لذوي الأبصار والبصائر» لكمال الدّين الفارسيّ* . ثم ظهرت هذه النّظريّةُ ثانيةً في عمل روبرت هوك «**الرّسوم الصّغيرة** *Micrographia*» (عام ١٦٦٥) ، واكتملت عناصرُها على يد كريستيان هويْغِنْز في كتابه العظيم «**رسالة في الضّوء** *Treatise on Light*» (الذي وضعَهُ بالفرنسيّة عام ١٦٧٨ ونشرَهُ عام ١٦٩٠) . فاعتمدتْ هذه النّظريّةُ على فكرةِ وسَطٍ تُبَثّ خلاله الموْجاتُ الضّوْئيّةُ وتنتشرُ (مقارنةً مع بثّ الصّوت وانتشارِه) .

هكذا بدأ ، وبكلّ براءةٍ فيما يبدو ، تاريخُ مفهوم الأثير الذي قُدّرَ له أنْ ينهضَ بدوْرٍ حاسمٍ في فيزياء النّصف الثّاني من القرن التّاسعَ عَشَرَ . دعوني ألخّص هذا التّاريخَ في سلسلةٍ من اللّمعِ الخاطفة :

(١) لقد تعثّرتْ – في بادئ الأمر– النّظريّةُ الموْجيّةُ للضّوْء ، نظراً

* هو الرّياضيّ والفيزيائيّ المسلم المتوفّى عام ٧٢٠هـ/ ١٣٢٠م ، الذي قام بتنقيح كتاب «المناظر» لابن الهيثم العظيم ، المتوفّى سنة ٤٣٠هـ/ ١٠٣٨م تقريباً . هنا أقفُ قليلاً لأحثُكُم على دراسة هذا الموْضوع بتمعّن ، خصوصاً بعد صدور الأجزاء الثّلاثة الأولى من هذا الكتاب الفَذّ بالكويت في طبعة منقّحة رائعةً للدّكتور عبد الحميد صَبْرَة (عام ١٩٨٣) . فثمّة فصول في تاريخ ماهيّة الضّوء لنْ تكتملَ إلا بعد دراسةِ فكر ابن الهيثم وتلامذتهِ في سياقهِ الصّحيح .

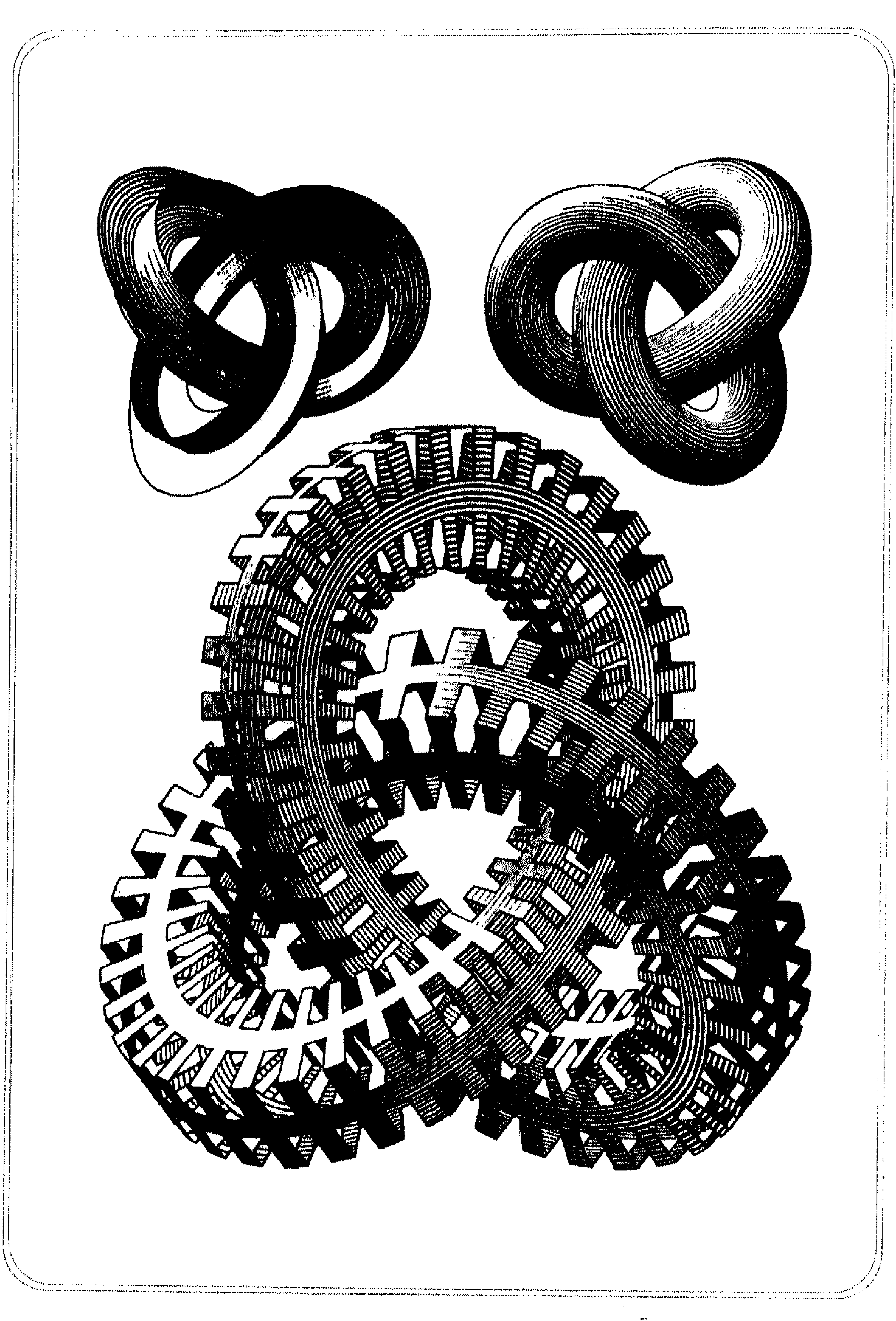


Crystal (1947) بلّورة (١٩٤٧)

Mezzotint, 138 x 171 ($5^3/_8$ x $6^3/_4$")

لنفوذِ أتباع نيوتن الذين فرضوا النّظريّةَ الدّقائقيّةَ للضّوْء (نسبةً إلى دقيقة ، بمعنى جُسَيْم) ؛ مع أنّ نيوتن نفسَهُ أحجمَ دائماً عن الالتزام بأيّ رأي قاطع عن ماهيّةِ الضّوْء . وقد عزّز هيمنةَ التّصوّر الجُسيْميّ هذا الاكتشافُ الرّئيسيّ في علم البصريّات في النّصف الأوّل من القرن الثّامنَ عَشَرَ . . . أعني اكتشافَ جيمس برادلي عام ١٧٢٨ ظاهرةَ الزّيْغِ النّجميّ . فمواقعُ النّجوم الظّاهريّةُ تختلِفُ عن مواقعِها الحقيقيّةِ بسبب حركةِ الأرض (أو - بكلماتٍ أكثرَ دقّةً - بسببِ التّغيّرِ في متّجهِ سرعةِ الأرض في أثناءِ دوَرانِها حوْلَ الشّمس) . وقد وجدتْ هذه الظّاهرةُ تفسيراً مباشراً بدِلالة النّظريّةِ الدّقائقيّة للضّوءَ ، وكأنّ الضّوءَ مكوّنٌ من دقائقَ تنجمعُ سرعتُها مع سرعة الإطار المرجعيّ (أي الأرض) جَمْعاً اتّجاهياً . . . تماماً مثل مسألة قُطَيْراتِ المطر التي يشاهدُها مراقبٌ ساكنٌ على الأرض ساقطةً بشكل رأسيّ ؛ في حين تبدو لمراقبٍ آخرَ في مركبةٍ تتحرّك بانتظام وكأنّها تنحرفُ عن العمودِ الرأسيّ بزاويةٍ ما .

(٢) لكنّ نجمَ النّظريّةِ الموْجيّةِ أخذَ في الصّعود ثانيةً بدخول ثوماس يَنْغ مسرحَ الأحداث في بواكير القرنِ التّاسعَ عشر . فأصرّ على تفوّقِ هذه النّظريّة في تفسيرِ انعكاس الضّوْء وانكسارِه ؛ كما صاغ قانونَ تداخُل الضّوء الذي استخدمَهُ لتفسير ظاهرةِ الحَيْد (أو الحُيُود) وحَلقَات نيوتن المعروفة . وكان تفسير يَنْغ لظاهرة الزّيْغ النّجميّ كالآتي : إذا افترضَ أنّ الأثيرَ المحيطَ بالأرض ساكنٌ ولا يتأثّر قَطّ بحركة الأرض ،



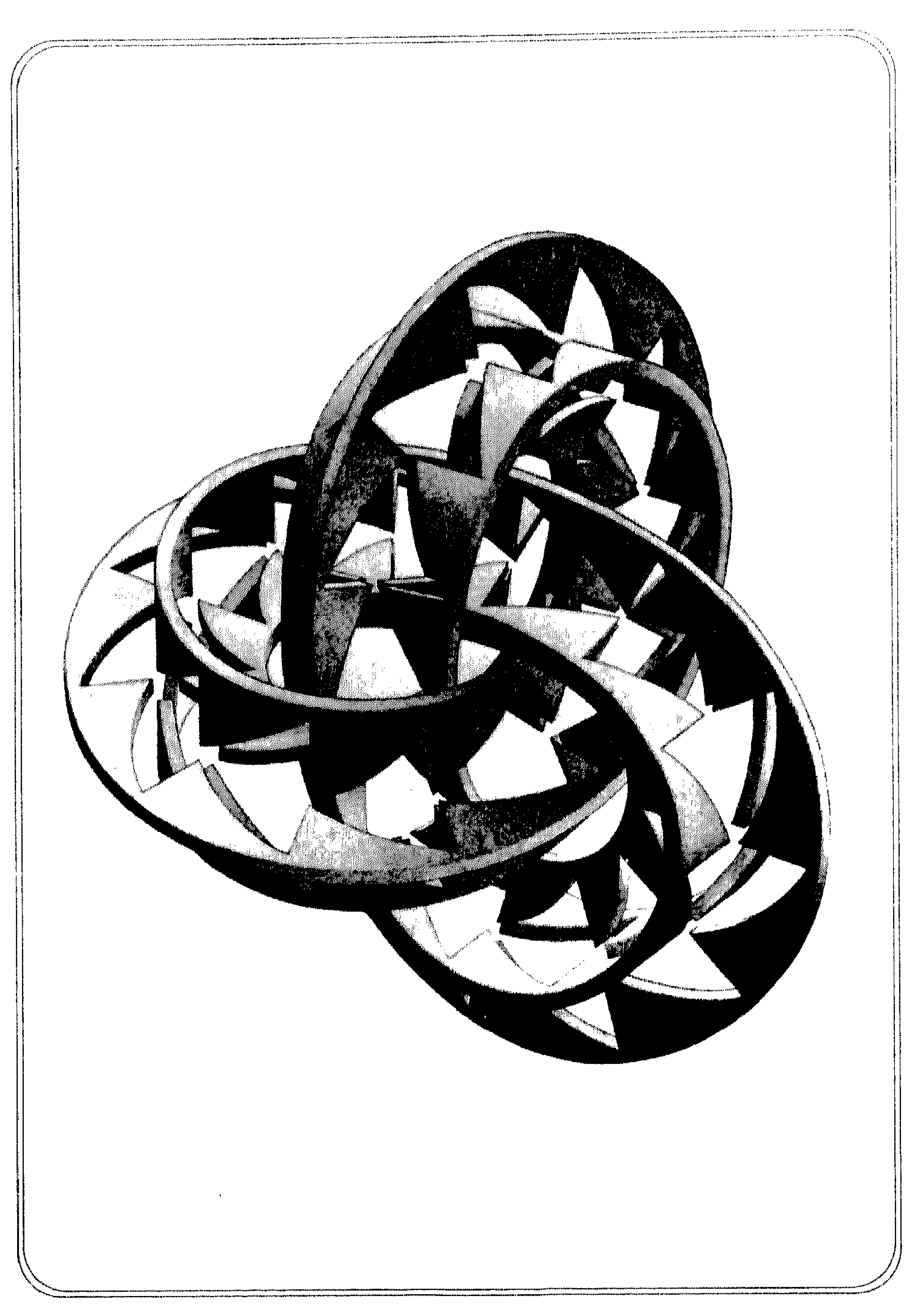
Knots (1965) عُقَد (١٩٦٥).

Woodcut in three colors, 430 X 320 ($16^{7}/_{8}$ X $12^{5}/_{8}$")

فإنّ الموجاتِ الضّوْئيّةَ لنْ تشاركَ في حركة المقراب (التلسكوب) ؛ لذا ، فإنّ صورةَ النّجم ستُزاحُ مسافةً تساوي تلك التي تتحرّكُها الأرض في الوقت الذي يقطـعُ الضّـوءُ المسافةَ المساويةَ لطول أنبوب المقراب . المهمّ أنْ نلاحظَ أنّ هذا الافتـراضَ يستلزمُ عدمَ تأثّرِ الأثير بحـركـةِ المقـراب (حتى ذلك الموجود داخلَ أنبوبه) . من هنا ، فقد اعتقد يَنْغ بأنّ الأثيرَ يتغلغلُ كلّ الأجسام المادّيةِ دون أيّ مقاومةٍ تُذْكَر .

(٣) بعد ذلك تتابعت انتصاراتُ النّظريّةِ الموْجيّة ، خصوصاً على أيدي عددٍ من فيزيائيّي فرنسا البارزين في القرن التّاسعَ عَشَر . . . أراغو وفرينل وفيزو وفوكو . وبالتّالي ، استحوذتْ فكرةُ الأثير على ذهنِ العصرِ كلّه ؛ وأصبح ثمّة اعتقادٌ راسخٌ بوجود هذا الأثيرِ كإطارٍ مرجِعيّ ثابت تتحـرّك فيـه الأرضُ حـركـةً مطلقـة . ومع ذلك ، فلمْ يَخْلُ الأمـرُ من مفارقات . فمثلاً ، لتفسير سرعةِ الضّوء الهائلة ، كان لابُدّ للأثير من أنْ يتّسمَ بجساءة (أو صلادة) كبيرة ؛ تماماً كما أنّ سرعةَ ذبذبات النّابض (الزّنبرك) لا تكونُ كبيرةً إلاّ إذا كان عالي القساوة . . . لكن ، إذا كان الأمـرُ كذلك ، فكيف نعلّلُ عدمَ وجود أيّ مقـاومـةٍ تقلّل من سرعـةِ الأرض وسواها من الكواكب عَبْرَ هذا الأثيرِ المزعوم؟!

(٤) على صعيد آخر ، كان مفهومُ المجال قد أخذ يُلقي ظِلالَهُ الكاسحةَ على الفكر الفيزيائيّ ، بدءاً بإنجازات فارادي عام ١٨٣١ . وكان



Knots (1966) عُقَد (١٩٦٦)

Pencil and black crayon, 371 X 341 (14⅝ X 13⅜")

السّؤال : كيف تُنْقَلُ التّأثيراتُ الكهربائيّةُ والمغناطيسيّةُ عَبْرَ الفضاء؟ هل ثمّة أثيرٌ آخرُ متميّز عن الأثير الضّوئيّ؟ فأتى الجوابُ على يديْ ماكسويل عام ١٨٦١ ضمن إطار النّظريّة الكَهْرَمغناطيسيّة للضّوء؛ إذْ إنّ الضّوء - بموجب هذه النّظريّة - إنْ هو إلاّ ذبذباتُ المجالَيْن الكهربائيّ والمغناطيسيّ المتعامدَيْن مع اتّجاهِ البَثّ والانتشار. فالسّرعةُ التي تُنْقَلُ بها التّأثيراتُ الكهربائيّةُ والمغناطيسيّةُ هي سرعةُ الضّوء نفسُها، التي يمكنُ حسابُها لأيّ وسَطٍ من خصائصه الكهربائيّةِ والمغناطيسيّة... إنجاز رائع وَحّدَ ظواهرَ الضّوْء والكهرباء والمغناطيسيّة تحت مظلّةٍ واحدة. لكنّ الأثيرَ بقي حقيقةً لا فكاك منها! (انظروا مثلاً في مقالة ماكسويل عن هذا الأثير في الطّبعة التّاسعة من **«دائرة المعارف البريطانيّة»**؛ فنحن الآن في نهاية السبعينيّات من القرنِ التّاسعَ عشر.)

(٥) وأخيراً نأتي إلى **تجربة ميكلصن** الشّهيرة (عام ١٨٨١) التي أعادها ميكلصن ومورلي عام ١٨٨٧. الفكرة الرئيسيّة هنا تكمنُ - باختصار - في مقارنة الزّمنيْن اللّذيْن يستغرقُهما مساران ضَوْئيّان متساويان يبدآن من نقطةٍ معيّنة ويعودان إليهما: أوّلهما موازٍ لحركة الأرض المزعومة عَبْرَ الأثير؛ وثانيهما متعامدٌ مع اتّجاه هذه الحركة. فالمفروض أنْ نلاحظَ فَرْقاً يمكنُ حسابُهُ من تفحّص نمطِ تداخُل الشّعاعيْن؛ وهذه هي الفكرةُ الأساسيّة فيما يُدعى مقياسَ التّداخُل أو المِدخال. [والحقّ أنّ المسألةَ هنا أشبهُ بمسألة السّباحيْن اللّذيْن يتمتّعان



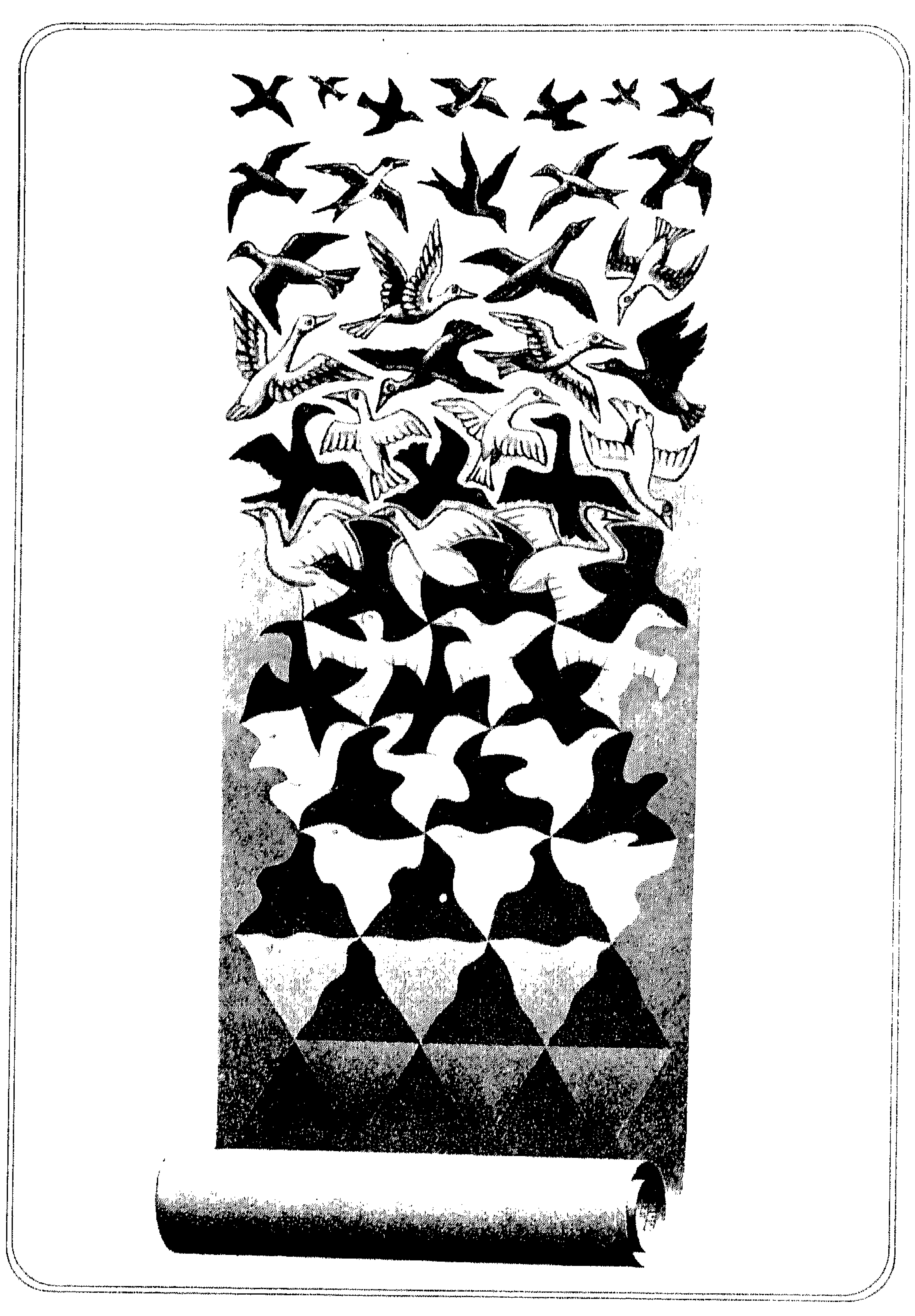
Convex and Concave (1955) مُحَدّبٌ ومُقَعّر (١٩٥٥)

Lithograph, 275 X 335 ($10^7/_8$ X $13^1/_8$")

بقُدُرات مماثلة ويقطعان مسافتيْن متساويتْن من نقطة البداية المشتركة وعَوْداً إليها ؛ فيسبحُ أحدُهما بموازاةِ التيّار المائيّ (معه وضدّه ؛ ذهاباً وإياباً) ، ويسبح الثّاني باتّجاه متعامد مع التيّار.] فماذا كانت نتيجةُ التّجربة؟ . . . سلبيّة ؛ أي لا فرْقَ مطلقاً في الزّمنيْن! وتستطيعون أنْ تتخيّلوا ارتباك العالم الفيزيائيّ وحيْرتَه . غيْرَ أنّه تشبّتَ بأثيرِه تشبُّثَ الغريقِ بالقَشّة . . . .

□ نسبيّةُ آينشتايْن ومبدأُ ثبوتِ سرعةِ الضّوْء

هكذا كان الوضعُ عندما ولجَ ألبرت آينشتايْن أجمةَ الأفكار هذه ، مزوّداً بعقل نقْديّ ثاقب ومقدرةٍ خارقةٍ على النّفاذ إلى لبّ الأشياء وجوْهرها وعلى تجاوز الافتراضاتِ الظّاهرة إلى الافتراضاتِ الضّمنيّة . فماذا فعل؟ . . . تخلّص أوّلاً من فكرة الأثير الضّوئيّ بجرّة قلم واحدة ؛ إذ لاحظ أنّ هذه تقفُ حجر عثرةٍ أمامَ وَحْدةِ القوانين الفيزيائيّة . . . بمعنى أنّه إذا كان مبدأ النّسبيّة صالحاً لقوانين الميكانيكا (أي أنّ الأطرَ المرجعيّةَ القصوريّةَ متكافئةٌ نسبة إلى قوانين الميكانيكا ، كما عَرَفَ غاليليو ونيوتن) ، فكيف يُعقلُ أنْ لا يكونَ صالحاً أيضاً للقوانين الفيزيائيّة الأخرى (مثل قوانين الكَهْرَمغناطيسيّة) ، لاسيّما أنّ وجودَ الإطار المرجعيّ المطلق (أي الأثير الكَوْنيّ) لم تعزّزْه التّجربةُ أبداً؟ من هنا ، كان الافتراض الأوّل في نظريّة آينشتايْن :



Liberation (1955). تَحْرير (١٩٥٥)

Lithograph, 440 x 200 ($17^3/_8$ x $7^7/_8$")

(١) إنّ الأُطرَ المَرْجِعيّةُ القصوريّةَ متكافئةٌ نسبةً إلى القوانين الفيزيائيّة كافّة .

وهذا هو مبدأ نسبيّة آينشتايْن .

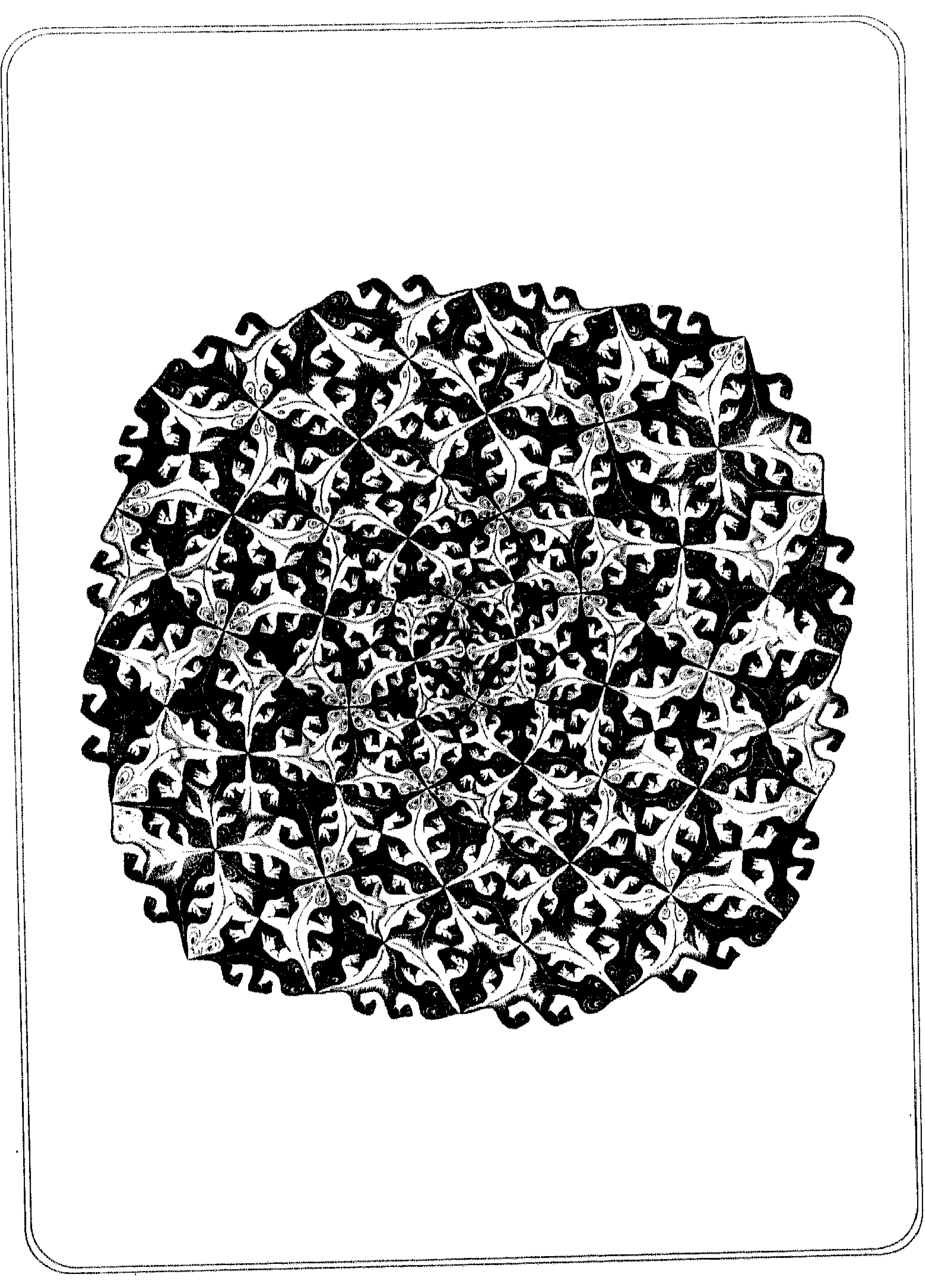


حركة الأرض لا تغيّرُ سرعةَ الضّوء : سقوط نظريّة الأثيرِ الكوْنيّ .

. . . لكنْ تبقى مشكلةٌ هنا : إنّ ميكانيكا نيوتن لا تسري عند سرعة الضّوء أو السّرعات القريبةِ منها ؛ أي أنّ المعادلاتِ التّحويليّةَ التّقليديّةَ (الكلاسيكيّة) التي ذكرْتُها سابقاً لا تصلح للظّواهر الضّوئيّة أو

الكَهْرَمغناطِيسيّة . لذلك ، فإنّ صلاحيّةَ افتراض آينشتايْن الأوّل إنّما تقتضي تغيير قوانينِ «اللّعبة» الرّياضيّة . . . أي قوانينِ الحركة والمعادلات التّحويليّة ، بحيث نستعيدُ القوانينَ التّقليديّة (الكلاسيكيّة) عندما تكون قيمةُ السّرعات أقلَّ بكثير من سرعة الضّوء .

فكيف عالجَ آينشتايْن هذه المشكلة؟ . . . استشفّ ببصيرتِهِ الثّاقبةِ أنّ السّرّ يكمنُ في مفهوم الزّمان . فحتّى ذلك الوقت ، كان تحليلُ الحركة يعتمدُ على افتراض وجود زمان مطلق ؛ أي ساعةٍ كوْنيّةٍ كما رأينا . أما آينشتايْن فعاد إلى الأوّليّات ، وذكّرنا بأنّ أيّ عمليّة قياسٍ للزّمن لابدّ من أنْ تستخدمَ تلك الأداةَ الفيزيائيّةَ المعروفة . . . أعني السّاعة (بمعناها الواسع العريض ؛ فقد تكون نَبْضي أو نَبْضَك ، أو جهازَ ليزر ، أو بلّورة كوارتز ، أو زمرةً من الجسيْمات المشّعة ، أو أيّة ظاهرة طبيعيّة تتواترُ بانتظام)! والقياسُ الزّمنيّ إنّما يشمِلُ بالضّرورة مفهومَ التّزامن . فعندما نقول إنّني وصلت إلى قاعة المحاضرات في السّاعة الخامسة ، فهذا يعني تزامُنَ حَدَثِ وصولي مع تأشير عقاربِ ساعاتِكم عند هذا الوقت (أو ظهور الرّقم المناسب في ساعاتكم الرّقميّة) . وهذا أمر بديهيّ إلى أبعد الحدود إذا كنّا في مكان واحد . لكن ما معنى التّزامُنِ في مكانيْن مختلِفيْن؟ لو كان بمقدورنا نقلُ المعلومات بسرعة لامتناهية ، لما كانت ثمّة مشكلة . فكان اقتراحُ آينشتايْن أنْ نستخدمَ الإشارةَ الضّوئيّة (أي الكَهْرَمغناطيسيّة) لتحديد العَلاقة بين القياسات الزّمنيّة في المواضع المختلفة ، ولتعريفِ مفهومِ التّزامُن ، على النّحو الآتي : لنفرضْ أنّ ثمّة



Division (1956) قِسْمَة (١٩٥٦)

Woodcut, 380 x 380 (15 x 15")

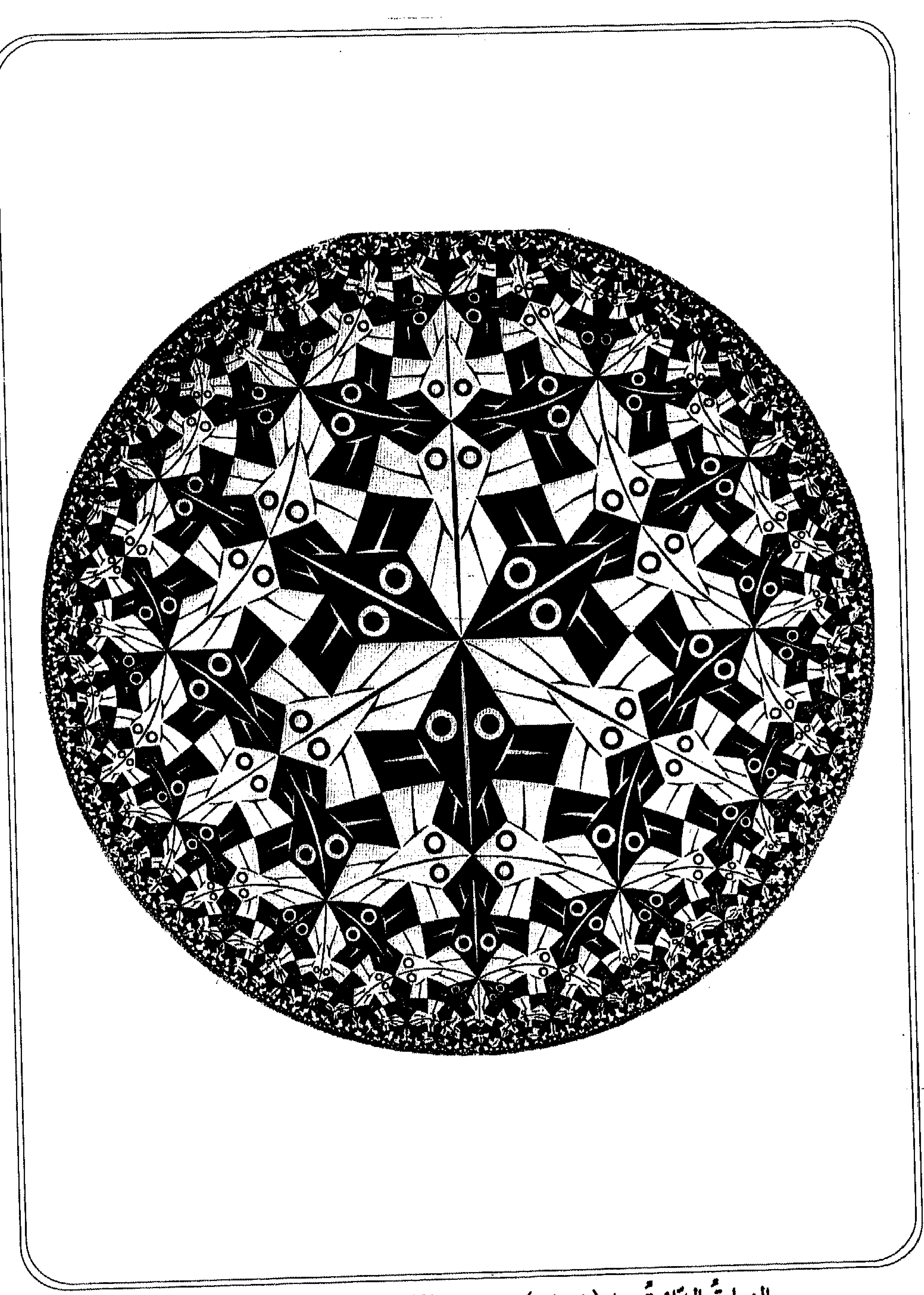
محطّتيْ رَصْد أ و ب في موضِعيْن مختلِفيْن . واضح أنّ بمقدورنا تحديدَ «زمن أ» بساعةٍ في أ ، و «زمن ب» بساعةٍ في ب . فحتّى نعرّفَ زمناً مشترَكاً لـ أ و ب ، نقول (من باب التّعريف) إنّ الزّمنَ اللاّزمَ لإشارة ضوْئيّة كي تقطعَ المسافةَ من أ إلى ب يساوي الزّمنَ الذي تتطلّبه كي تقطعَ المسافةَ من ب إلى أ . وهكذا ، إذا بدأت الإشارة من أ عند الزّمن ز = صفراً ، ثمّ انعكستْ بمرآة عند ب ، ومن ثمّ عادتْ أدراجَها إلى أ عند ز = س ، فإنّ الزّمنَ الذي تستغرقُهُ الإشارةُ للوصول (من أ) إلى ب يُعرّف بأنّه س/٢ . وهذا يُعطينا إجراءً محدّداً لتعريف تزامُن ساعات موجودة في مواضعَ مختلِفة ؛ كما أنّه يُوْحي بأنّ سرعةَ الضّوْء في الفراغ لها قيمةٌ واحدةٌ تحت كلّ الظّروف . والحقيقة أنّ العبارةَ الأخيرةَ تشكّلُ افتراضَ آينشتايْن الثّاني في نظريّته :

(٢) إنّ سرعةَ الضّوْء في الفراغ لها دائماً قيمةٌ ثابتة (هي التي ذكرتُها في مطلع محاضرتي) ، بصَرْف النّظر عن سرعة مصدر الضّوء .

وهذا هو مبدأ ثبوت سرعة الضّوء .

أصبح لدينا ، إذاً ، افتراضان :

(١) مبدأ نسبيّة آينشتايْن ؛



Circle Limit I (1958) النهايةُ الدّائرةُ -١ (١٩٥٨)

Woodcut, diameter 418 (16½")

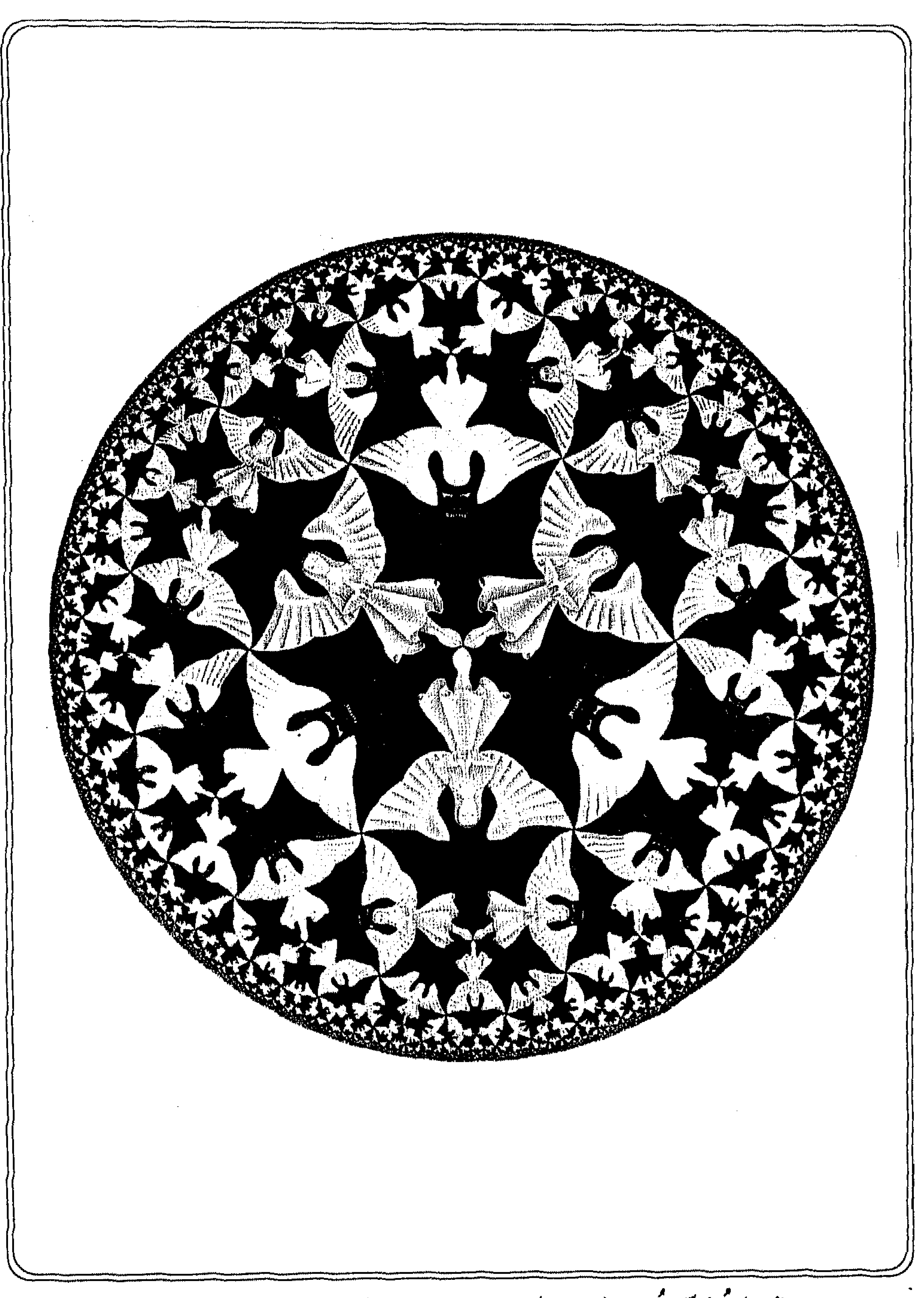
(٢) ومبدأ ثبوتِ سرعةِ الضّوء [في الفراغ].

وعلى هذيْن العِمادَيْن فقط ليس غيْر، شيّد ألبرت آينشتايْن صَرْحَ الميكانيكا الجديدة... ميكانيكا النّسبيّة (الخاصّة)!... ألمْ أقلْ إنّ نسبيّة آينشتايْن تتّسم باقتصادٍ بليغٍ في التّفكير والتّعبير، وبسهولةٍ ممتنعة؟

□ الزّمكانُ وقياسُ الأزمنة

لكنْ ما نتائجُ هذا كلّه في عالَمنا الطّبيعيّ، حيث التّجربةُ هي الفَيْصل، وحيث لا يعترفُ علم الفيزياء - في نهاية المطاف - إلاّ بالأرقام التي تدلّ عليها مؤشّراتُ مقاييسِهِ وأجهزته؛ فهو علمُ القياس وفنّه؟!

لنبدأ بالأطوال والمسافات. فالطّول الحقيقيّ - وَفْقاً للنّسْبيّة - هو ذاك الذي يقاسُ في الإطار المَرْجِعيّ الذي يكون فيه الجسمُ ساكناً؛ ويتّم هذا بقياس موضعَيّ النّهايتيْن في آنٍ معاً. أمّا إذا أريد قياسُ طولِ الجسم من وجهة نظر إطار يتحرّك بسرعةٍ منتظِمةٍ نسبةً إلى الإطار الأوّل، فيجب أنْ يتمّ ذلك بحيث يُقاس موضعاً نهايَتيّ الجسم في آنٍ معاً نسبة إلى الإطار المتحرّك نفسه. وسنجدُ عندئذٍ أنّ الطّولَ يكونُ أقلّ من ذلك الذي دعوناهُ الطّول الحقيقيّ؛ أي أنّ الطّولَ انكمشَ من وجهة نظر الإطار الثّاني. وهذا ما لاحظَهُ السّندبادُ في رحلتِهِ الفلكيّة...



Circle Limit IV (1960) النهايةُ الدّائرةُ -٤ (١٩٦٠)

Woodcut in two colors, diameter 417 (16 3/8")

معنى ذلك أنّ قياسَ الطّول يعتمدُ بشكل جذريّ على مفهوم التّزامن ؛ وهذا يختلفُ من إطار لآخر . لا غرْوَ ، إذاً ، أنّ الطّولَ يختلِفُ من إطار لآخر ؛ ولاغرْو أنّ الحدودَ الفاصلةَ بين المكان والزّمان قد تلاشتْ في النّسبيّة! فثمّة «زمكان» ، إنْ شئتم ؛ والزّمانُ بُعْدٌ رابع يُضاف إلى الأبعاد المكانيّة الثّلاثة . وهذا جليّ واضح من المعادلات التّحويليّة التي اشتقّها آينشتايْن ؛ أي قوانين اللّعبة الجديدة . (وكان لورنتز قد اشتقّها قبل آينشتايْن بسنة واحدة مستخدِماً طريقةً مغايرةً تماماً ، وذلك لتعديل النّظريّة الكهْرَمغناطيسيّة ، بحيث يوفّق بين النّتيجة السّلبيّة لتجربة ميكلصُن ومورلي ووجود الأثير كإطار مرجِعيّ مطلق .)

إذاً ، ليس ثمّة زمانٌ مطلق أو مكانٌ مطلق . فماذا عن قياس الأزمنة؟ ماذا يحدثُ إذا قورنتْ مدّةٌ زمنيّةٌ مَقَيسةٌ بساعة واحدة في «إطارِها السّكونيّ» مع نتائجِ القياساتِ في إطار مرجعيّ تتحرّك هذه السّاعةُ بالنّسبة إليه؟ . . . سنجد أنّ المدّةَ الزّمنيّةَ المَقِيسةَ بالسّاعة السّاكنة تكون أقلّ من الفرق بين قراءتي السّاعة المتحرّكة اللّتيْن تصفان بدايةَ هذه المدّة ونهايتَها في الإطار الآخر ؛ وكأنّ مقياسَ الزّمان كما تسجّلُهُ السّاعةُ السّاكنةُ قد مُدّد أو مُطّ ؛ أي أنّ الزّمانَ يتمدّد أو يتباطأ نسبةً إلى الإطار المتحرّك . دعْني ألفت انتباهَكم هنا إلى أنّ هذه الظّاهرةَ تعتمدُ - في صميمِها - على مقارنة قراءتيْن متعاقبتيْن بساعة واحدة [تبقى ساكنةً في مكان واحد] مع قراءتيْن بساعتيْن مختلِفتيْن ؛ إذْ إنّه عندما تتحرّك السّاعة يُقاسُ الفرْقُ بين بدايةِ المدّةِ الزّمنيّةِ ونهايتِها في



Square Limit (1964) النهاية المربّع (١٩٦٤)

Woodcut in two colors, 340 x 340 (13³/₈ x 13³/₈")

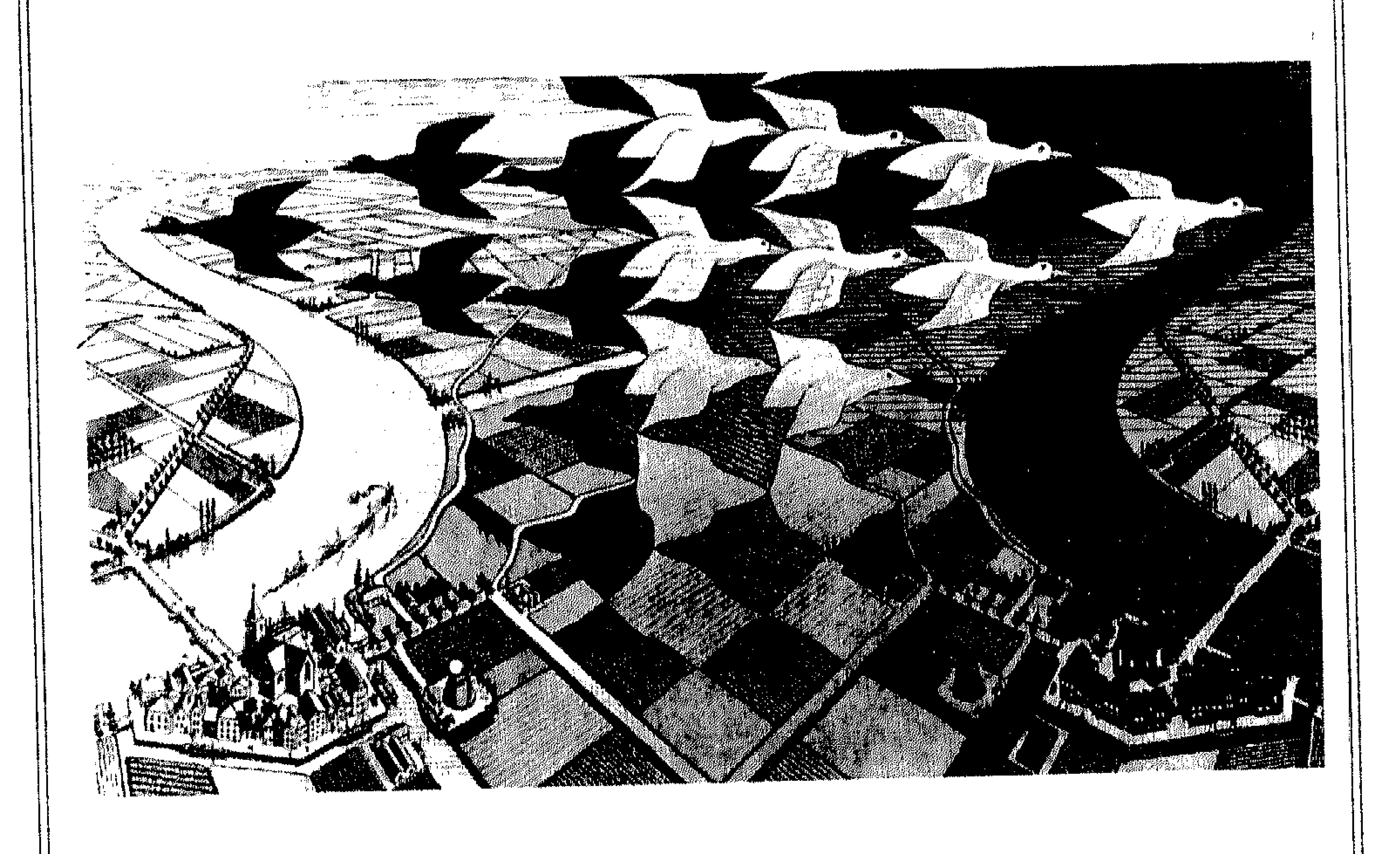
مكانيْن مختلِفيْن ، وهذا يشمَل تعريفَ آينشتايْن للتّزامن بواسطة تبادُلِ إشاراتٍ ضوْئيّةٍ أو لاسلكيّة . وهذا بدوْرِه مأخوذٌ بعيْن الاعتبار تلقائيًا في المعادلات التّحويليّة لنظريّةِ النّسبيّة .

هنا انفرجتْ أساريرُ السّندباد الفيزيائيّ انفراجَ مَنْ يرى النّورَ بعد ظلمة طويلة . فهو يفهمُ الآن تماماً ماذا حدث لشقيقِهِ التوأم ، السّندباد البّريّ ؛ إذ إنّ الزّمن تمدّد بالنسبة إليه على النحو الذي أدركناه لتوّنا . والأمر يُمسي بوضوح البلّور إذا استخدَمنا المعادلاتِ الرّياضيّةَ اللّازمة . ولا ننسى أيضاً أنّ المسافةَ انكمشت من وجهة نظر سندباد الفلكيّ وهو على مَتْن طائر الرّخّ العملاق .

إذاً ، فقد بات عندنا مفاهيمُ جديدةٌ للطّول والمدّة الزّمنيّة والتّزامُن ؛ كما أنّ الزّمانَ فقد استقلاليّتَهُ واندمج مع المكان ليشكّلا معا مفهوم الزّمكان . . . كلّ هذا جاء من علم حركة (كينماتيكا) يستندُ إلى افتراضيْن اثنيْن! ولكّنها بساطةُ العظمة التي تُسعدنا متى فقهناها في كلّ زمان ومكان . فنحن نجدُ هنا انسيابَ موتزارت وعُمْقَ بيتهوڤن .

□ الكتلةُ حَلْقةُ وَصْلٍ بين الزّخْمِ والسّرعة

ماذا عن علم التحرّيك (الدّيناميكا) الجديد؟ هنا استخدمَ آينشتايْن أسلوبَ «التّجربة الذّهنيّة» (أي التّجربة المعقولة والمنطقيّة التي تَحُولُ دون



Day and Night (1938) ليْلٌ ونهار (١٩٣٨)

Woodcut in two colors, 393 x 678 ($15^{1}/_{2}$ x $26^{3}/_{4}$")

إجرائها الفعليّ عوائقُ عمليّة) ؛ إضافةً إلى (الكينماتيكا) النّسْبويّةِ وقانونَيْ حفظ الزّخْم (= الكتلة × السّرعة) وحفظ الطّاقة الكلّية . فانتهى إلى أنّ :

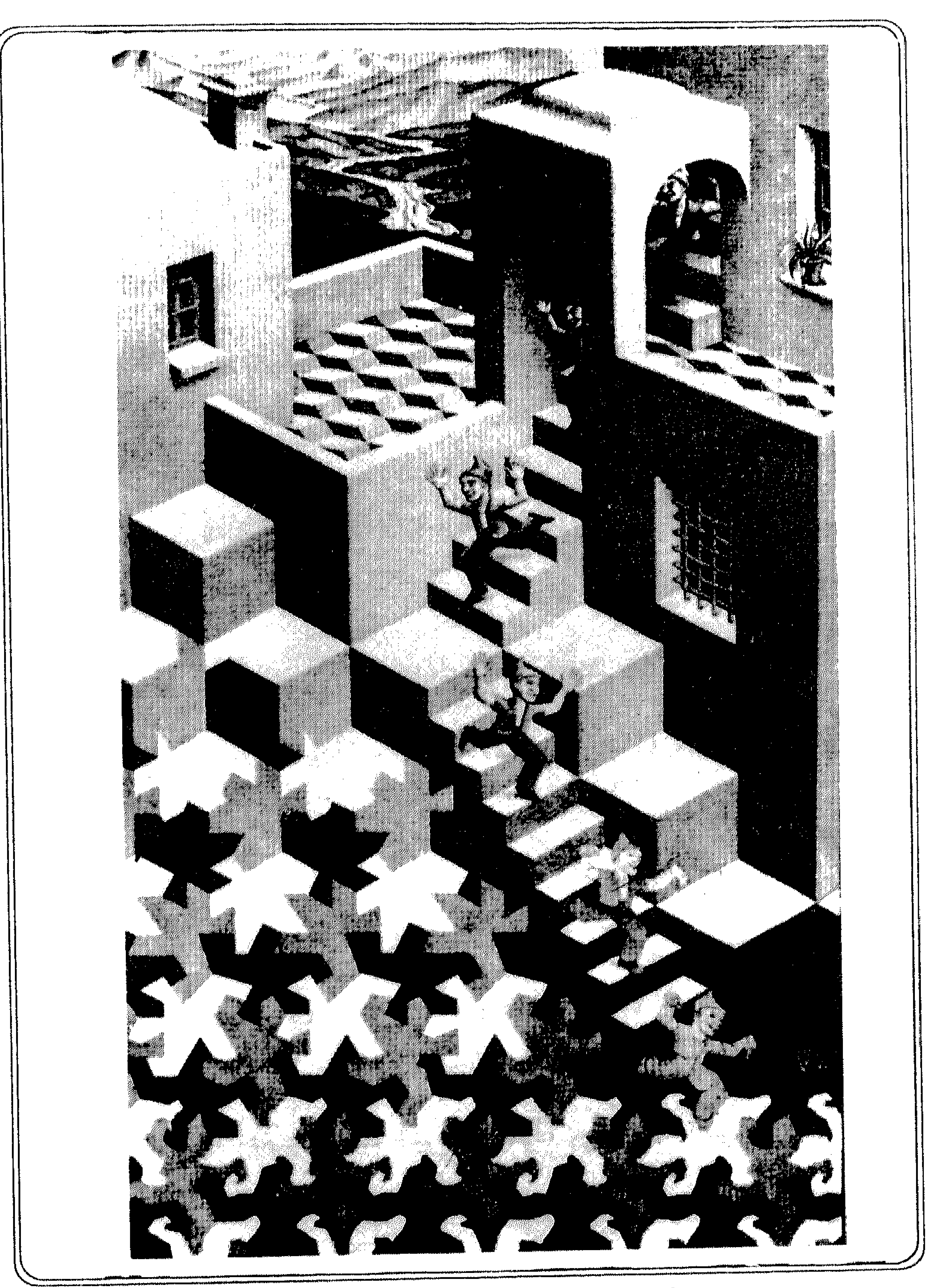
(١) القصور (≡ الكتلة) يتزايد مع السّرعة ؛ وأن :

(٢) الطاقة الإجماليّة = الكتلة × مربّع سرعة الضوء ؛

وبالتّالي :

التّغيّر في الطّاقة الإجماليّة = التّغيّر في الكتلة القصوريّة × مربّع سرعة الضّوء . . .

. . . أي أنّ ثمّة تكافؤاً بين الكتلة والطّاقة . وهذا مبدأ عام لقصورِ الطّاقة ، كما يُشار إليه أحياناً . ومن الأمثلة عليه تلك الطّاقةُ النّاتجةُ عن التّفاعُلات النّوويّةِ الحراريّةِ التي تحدثُ في النّجوم كالشّمس . فالطّاقةُ التي تصِلُنا من الشّمس تساوي $١,٣٥\times١٠^{٣}$(١٣٥٠) جولاً /م في الثّانية الواحدة ؛ وهذا يَعني أنّ كتلةَ الشّمس تتناقصُ بمعدّل $٤,٥ \times١٠^{٦}$ (٤,٥ مليون) طن/ث ؛ أي بنحو جُزْء واحد من $١٠^{١٣}$ جزء (١٠ و ١٣ صفراً إلى يمينها) في السّنة . وهذا بدوْره يتأتّى من سلسلةٍ من التّفاعُلاتِ النّوويّة أهمّها تلك التي يتحوّلُ بموجبِها الهيدروجين إلى الهيليوم[٤] .



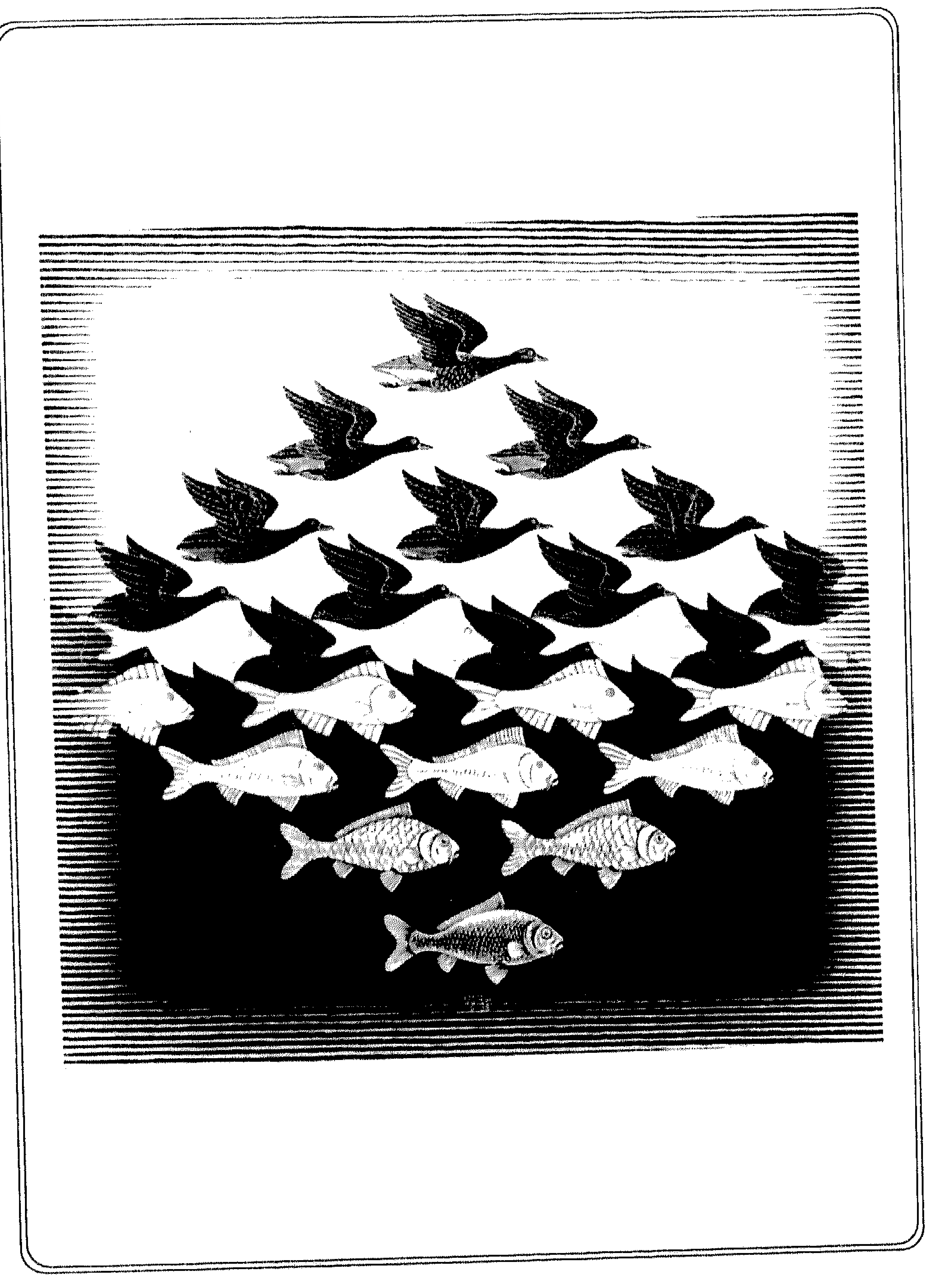
Cycle (1938) دَوْرَة (١٩٣٨)

Lithograph, 475 x 277 (18 3/4 x 10 7/8")

تبـقى هنا نقطتـان جـديرتان بالذّكـر : (الأولى) أنّ تكافـؤ الكتلة والطّاقـة قـانونٌ عـام لا يسـري فـقط على التّفـاعـلات النّوويّة . فـالحـجر المتحرّك ، مثلاً ، له كتلةٌ أكبرُ من كتلة الحجر نفسِهِ حين يكون ساكناً ؛ وفتيلةُ المصباحِ المضيء لها كتلة أكبر من كتلة الفتيلة نفسِها حين لا يكون المصباح مضيئاً ؛ وهكذا دواليك . بَيْدَ أنّ الكتلةَ المقرونةَ بالطّاقة تكون على الأغلب متناهيةَ الصّغَر . فعلى سبيل المثال ، تعادلُ الطّاقةُ الكهربائيّةُ اليوميّةُ التي تستهلكُها عمّان كتلةَ ١ غرام تقريباً فقط! أمّا (النّقطة الثانية) فمتعلّقةٌ بمفهوم الكتلة نفسه ؛ إذْ نلاحظ أنّ هذا المفهومَ أضحى هشّاً لأنّ كتلةَ الجسمِ تتغيّر باستمرار لأقلّ سبب . والحقيقة أنّ الكتلةَ في النّسبيّة (والفيزياء الحديثةِ عموماً) إنْ هي إلاّ حَلْقةُ وصْل بين الزّخْم والسّرعة ، أو الطّاقةِ الإجماليّةِ ومربّعِ سرعةِ الضّوْء!

□ النسبيّةُ الخاصّةُ والنسبيّةُ العامّة

بقيتْ كلمةٌ موجزةٌ عن مصطلح النسبيّة الخاصّة (أو المقيّدة) ؛ فهي خاصّة أو مقيّدة بالأطر القصوريّة ، بخلاف النّسبيّةِ العامّةِ التي تنطلقُ بكلّ حريّة لتتناولَ الأطرَ المتسارعة . والنّظريّة العامّة تُدْخلُ الجاذبيّة في الموضوع ؛ فهي تبدأ من ملاحظة غاليليو أنّ تسارعَ السّقوط الحُرّ (أيّ تسارعَ الجاذبيّة الأرضيّة) لا يعتمد على طبيعة الأجسام . وقد عبّر آينشتاين عن هذه الحقيقة كما يأتي :



Sky and Water I (1938) ماء وسماء -١ (١٩٣٨)

Woodcut, 440 x 440 ($17^3/_8$ x $17^3/_8$")

« تتصرّفُ الأشياءُ في مجال جاذبيّ (صغير الامتداد المكانيّ) كما تفعل في فضاء خلْوٍ من الجاذبيّة ، إذا اعتمدْنا ، بدلاً من «نظام قصوريّ» ، نظاماً مَرْجعياً متسارعاً [نسبة إلى نظام قصوريّ]» . . . .

وهذا هو مبدأ التّكافؤ المعروف ، الذي يكون بموجبه مجال جاذبيّ مكافئاً تماماً (على امتداد رقعة محدودة) لمجالٍ مفترَض مقرونٍ بتسارع عام [مساوٍ لتسارع الجاذبيّة] للإطار المَرْجِعيّ . وتنشأ الجاذبيّة عن تغيّر في انحناء الزّمكان النّاتج بدوْرِه عن وجود المادّة! . . .

. . . ولكنّ هذه مغامرةٌ أخرى من مغامرات السّندباد الفيزيائيّ سأقصّها عليكم في حينِه . أمّا الآن ، فقد أدركَنا الصّباح ، ويجب أنْ نسكتَ عن الكلامِ المباح (على الأقلّ مؤقّتاً) . □



Dewdrop (1948) قَطْرَةُ نَدَى (١٩٤٨)

Mezzotint, 178 x 245 (7 x 9 5/8")

الجُزْءُ الثّاني

الملَاحِق

صفحة

المُلْحَقُ الأوّل (١) : قامُوسُ المُصْطَلَحات (١) ٦١
(حَسْبَ التّرتيبِ الهِجائيّ الإنْكليزيّ)

المُلْحَقُ الثّاني (٢) : قامُوسُ المُصْطَلَحات (٢) ٦٩
(حَسْبَ التّرتيبِ الهِجائيّ العربيّ)

المُلْحَقُ الثّالث (٣) : قامُوسُ الأعْـــلام ٧٧
(حَسْبَ التّرتيبِ الهِجائيّ الإنْكليزيّ)

المُلْحَقُ الرّابِع (٤) : التّرجمةُ الإنْكليزيّةُ الأمينةُ لورقةِ آينشْتايْن المشهورة في النّسْبيّةِ الخاصّة ٨٣
[«في التّحريك الكَهْرَبائيّ (الدّيناميكا الكَهْرَبائيّة) للأجسامِ المتحرّكة»]

المُلْحَقُ الخامس (٥) : المصادرُ والمراجع ١٠٩
أ) المَرْجِعيّة (البِبْليُوغْرافيا)
ب) مراجعُ مختارة

المُلْحَــقُ الأوّل (أ)

قامُوس المُصْطَلَحَات

(١)

(حَسْبَ التّرتيبِ الهِجائيّ الإنكليزيّ)

إنكليزي – عربي

English	عربي
absolute	مُطلَق
accelerating	مُتَسارِع
acceleration	تَسَارُع
analytic geometry	الهندَسة التّحليليّة
approximation	تَقْرِيب
assumption	افْتِراض
calorimeter	مِسْعَر
chain	سِلسِلَة
circular	دائريّ
classical mechanics	الميكانيكا التّقْليديّة (الكلاسيكيّة)
comet	مُذَنّب
conservation	حِفْظ
constancy	ثَبَات ؛ ثُبُوت
contract	يَنْكَمِش
contraction	انْكِمَاش
coordinate	إحْدَاثيّ
coordinate system	نِظام إحْداثيّ
corpuscle	دَقِيقَة
corpuscular	دقائقيّ
cosmic clock	ساعَة كَوْنيّة
crystal	بِلّورَة
curvature	انْحِناء ؛ تَقَوُّس
deviate	يَنْحَرِف
deviation	انْحِراف
diffraction	حَيْد ؛ حُيُود
digital	رَقميّ
dilation	تَمَدُّد

dimension	بُعْد
dynamics	التّحريك (الدّيناميكا)
earth	الأَرْض
earth year	سَنَة أَرْضِيّة
effect	تأثير
electric	كهْرَبائيّ
electrodynamics	التّحْريك الكَهْرَبائيّ (الدّيناميكا الكَهْرَبائيّة)
electromagnetic	كهْرَمَغْناطِيسيّ
empty space	فَرَاغ
energy	طاقَة
equivalence	تَكَافُؤ
equivalent	مُكَافِيء
ether	الأثير
field	مَجَال
fission	انشطار
force	قُوّة
frame	إطار
free fall	سُقُوط حُرّ
fusion	انْدِماج
galaxy	مَجَرّة
Galilean relativity	النّسْبيّة الغَاليليّة
gedanken experiment	تَجْرِبة ذِهْنِيّة
general relativity	النّسْبيّة العامّة
gravity	جاذِبيّة
hypothesis	فَرْضِيّة
inertia	قُصُور
inertial	قُصُوريّ
infinite	لامُتَنَاهٍ

infinity	مالانهايَة
interference	تَدَاخُل
interferometer	مِدْخَال ؛ جِهاز تَدَاخُل
invariance	لاتَغَيّر
invariant	لامُتَغَيّر
kinematics	عِلْم الحَرَكَة (الكِيْنماتيكا)
laser	لِيزر
law	قانُون
length	طول
light year	سَنَة ضَوْئيَة
luminiferous	ضَوْئيّ
macroscopic	جَاهِرِيّ
magnetic	مَغْناطيسيّ
mass	كُتْلَة
material	مادّة ؛ مادّيّ
mathematical physics	الفيزياء الرِّياضِيّة
matter	مادّة
measurement	قِيَاس
mechanics	الميكانيكا
medium	وَسَط
microscopic	مِجْهَرِي
momentum	زَخْم
nuclear	نَوَوِيّ
optical path	مَسَار ضَوْئيّ
optics	الضَّوْء
oscillation	ذَبْذَبَة ؛ تَذَبْذُب

parabola	قطع مكافيء
paradox	نقيضَة ؛ مُفارَقة
parallel	مواز
particle	جُسَيْم
pattern	نَمَط
perpendicular	مُتعَامِد
phenomenon	ظاهِرَة
planet	كَوْكَب
position	مَوْضِع
postulate	فَرْض ؛ مُسَلَّمَة
principle	مَبْدأ
propagate	يَنْتَشِر
pulse	نَبْض
quantum mechanics	ميكانيكا الكَمّ
quartz	كوارتْز
radiation	إشْعَاع
radioactive	مُشِعّ
radium	راديوم
reaction	تَفاعُل
reference frame	إطار مَرْجِعِيّ
reflection	انْعِكاس
refraction	انْكِسَار
relativity	النِّسْبِيَّة
rest frame	إطار سُكُونيّ
restricted relativity	النِّسْبِيَّة المقيَّدة
rigid	جاسِيء
rigidity	جَسَاءة
ring	حَلْقَة
signal	إشارة

simultaneity	تَزَامُن
simultaneous	مُتَزَامِن
spacetime	زَمَكَان
special relativity	النِّسْبِيَّة الخاصّة
spring	نابِض (زُنْبرك)
stable	مُسْتَقِرّ
star	نَجْم
stationary	سَاكِن
stellar aberration	زَيْغ نَجْمِيّ
symmetric	مُتَمَاثِل
telescope	مِقْراب (تِلِسْكُوب)
thermonuclear	نَوَوِيّ حرارِيّ
time machine	آلة زَمَنِيّة
total energy	طاقة كُلِّيّة (إجْمالِيّة)
transformation	تَحْوِيل
transformation equation	مُعَادلة تَحْوِيلِيّة
transformation law	قانون تَحْوِيلِيّ
uniform	مُنْتَظِم
uniformly	بانْتِظام
unity	وَحْدَة
valid	صالح ؛ ساري المَفْعُول
vector	مُتَّجِه
velocity	سُرْعة
vertical	رأسِيّ
vibration	اهْتِزاز
visible	مَرْئِيّ
wave theory	النّظريّة المَوْجِيّة

المُلْحَقُ الثّـاني (٢)

قامُوس المُصْطَلَحَات

(٢)

(حَسْبَ التّرتيبِ الهِجائيّ العربيّ ؛ وقد رُدّت الكَلمةُ
إلى أصْلِها المُجَرّد ، كما هو مألوفٌ في المَعَاجِمِ العَرَبيّة)

عربي - إنكليزي

عربي	English
آلة زَمنيّة	time machine
تأثير	effect
الأثير	ether
الأرْض	earth
إشارَة	signal
إطار	frame
إطار مَرْجِعيّ	reference frame
إطار سُكُونيّ	rest frame
مَبْدأ	principle
بُعْد	dimension
بلّورة	crystal
ثَبَات ؛ ثُبُوت	constancy
جاذبيّة	gravity
تَجْربة ذِهْنيّة	*gedanken* experiment
مَجَرّة	galaxy
جَاسِي	rigid
جَسَاءة	rigidity
جُسَيْم	particle
جاهِري	macroscopic
مِجْهَري	microscopic
مجال	field
إحْداثيّ	coordinate
يَنْحَرِف	deviate
انْحِراف	deviation
عِلْم الحَرَكة (الكيْنماتيكا)	kinematics

التّحْريك (الدّيناميكا) — dynamics
التّحْريك الكَهْرَبائيّ (الدّيناميكا الكَهْرَبائيّة) — electrodynamics
حِفْظ — conservation
حَلْقَة — ring
انْحِناء ؛ تَقَوّس — curvature
حَيْد ؛ حُيُود — diffraction
تَحْويل — transformation

تَدَاخُل — interference
مِدْخال ؛ جِهاز تَدَاخُل — interferometer
دَقيقة — corpuscle
دَقائقيّ — corpuscular
انْدِماج — fusion
دائِريّ — circular

ذَبْذَبَة ؛ تَذَبْذُب — oscillation
مُذَنّب — comet

راسِيّ — vertical
مَرْئيّ — visible
راديُوم — radium
رَقْميّ — digital

زَخْم — momentum
زَمَكان — spacetime
تَزامُن — simultaneity
مُتَزامِن — simultaneous
(زنبرك) نابض — spring
زَيْغ نَجْميّ — stellar aberration

تَسَارُع — acceleration
مُتَسَارِع — accelerating

سُرْعة	velocity
ساري المَفْعُول ؛ صالح	valid
مِسْعَر	calorimeter
سقُوط حُرّ	free fall
ساكِن	stationary
سِلْسِلَة	chain
مُسَلَّمَة ؛ فَرْض	postulate
سَنَة أرْضيّة	earth year
سَنَة ضَوْئيّة	light year
ساعَة كوْنيّة	cosmic clock
مَسَار ضَوْئي	optical path
انْشطار	fission
إشْعَاع	radiation
مُشِعّ	radioactive
صالح ؛ ساري المَفْعُول	valid
الضَوْء	optics
ضَوْئيّ	luminiferous
مُطْلَق	absolute
طاقَة	energy
طاقَة كُلّيّة (إجْماليّة)	total energy
طُول	length
ظاهِرَة	phenomenon
مُعَادَلَة تَحْويليّة	transformation equation
انْعِكاس	reflection
مُتَعَامِد	perpendicular

invariance	لاتغيّر
invariant	لامُتَغَيِّر
assumption	افْتراض
postulate	فَرْض ؛ مُسَلّمَة
hypothesis	فَرْضيّة
reaction	تفاعُل
empty space	فَرَاغ
mathematical physics	الفيزياء الرِّياضيّة
approximation	تَقْريب
telescope	مِقْراب (تِلِسْكُوب)
stable	مُسْتَقِرّ
inertia	قُصُور
inertial	قُصُوريّ
parabola	قطْع مُكافِيء
law	قانون
transformation law	قانون تَحْويلي
curvature	تَقَوّس ؛ انْحناء
force	قُوّة
measurement	قِيَاس
mass	كُتْلَة
refraction	انْكِسَار
equivalence	تكَافؤ
equivalent	مُكافِيء
planet	كَوْكَب
contract	يَنْكَمِش
contraction	انْكماش
electric	كهْرَبائيّ
electromagnetic	كهْرَمَغْناطيسيّ
quartz	كوارْتز

kinematics	(الكِيْنماتيكا) عِلْم الحَرَكَة
infinite	لامُتَناهٍ
laser	لِيزِر
infinity	مالانِهايَة
symmetric	مُتَماثِل
dilation	تمدّد
material	مادّة ؛ مادّيّ
matter	مادّة
magnetic	مَغْناطيسيّ
mechanics	الميكانيكا
classical mechanics	الميكانيكا التّقْليديّة (الكلاسيكيّة)
quantum mechanics	ميكانيكا الكَمّ
pulse	نَبْض
spring	نابِض (زنْبرك)
star	نَجْم
relativity	النِّسْبيّة
special relativity	النِّسْبيّة الخاصّة
general relativity	النِّسْبيّة العامّة
Galilean relativity	النِّسْبيّة الغاليليّة
restricted relativity	النِّسْبيّة المُقيّدة
propagate	يَنْتَشِر
wave theory	النّظريّة المَوْجيّة
coordinate system	نِظام إحْداثيّ
uniform	مُنْتَظِم
uniformly	بانتظام
pattern	نَمَط
nuclear	نَوَوِيّ
thermonuclear	نَوَوِيّ حَرارِيّ

اهْتِزاز	vibration
الهَنْدسة التّحْليليّة	analytic geometry
مُتّجِه	vector
مُوَاز	parallel
وَحْدَة	unity
وَسَط	medium
مَوْضِع	position

المُلْحَقُ الثّالث (٣)

قامُوسُ الأعْـــلام

(حَسْب التّرتيبِ الهِجائيّ الإنْكليزيّ)

AL-FĀRISĪ, Kamal Al-Dīn (1266-1319)

الفَارِسِي ، كمال الدّين [الحَسَن بن علي بن الحَسَن] (٦٦٥-٧١٨هـ/ ١٢٦٦-١٣١٩م)

ARAGO, (Dominique-) François (-Jean) (1786-1853)

أرَاغُو ، (دُومينيك) فرانْسوَا (- جان) (١٧٨٦-١٨٥٣)

BECQUEREL, (Antoine-) Henri (1852-1908)

بِكرِيل ، (أنطوَان-) هنْري (١٨٥٢-١٩٠٨)

BEETHOVEN, Ludwig van (1770-1827)

بيتْهُوفِن ، لُودْفيغ فان (١٧٧٠-١٨٢٧)

BRADLEY, James (1693-1762)

برادْلِي ، جيمْس (١٦٠٣-١٧٦٢)

COPERNICUS, Nikolaus (1473-1543)

كُوبِرْنيكُوس ، نيكُولاوس (١٤٧٣-١٥٤٣)

CURIE, Marie [Sklodowska] (1867-1934)

كُوري ، ماري (سكلُودُوفْسكا) (١٨٦٧-١٩٣٤)

CURIE, Pierre (1859-1906)

كُوري ، پيير (١٨٥٩-١٩٠٦)

DESCARTES, René (1596-1650)

دِيكَارْت ، رِينيه (١٥٩٦-١٦٥٠)

EINSTEIN, Albert (1879-1955)

آينشتايْن ، ألبرْت (١٨٧٩-١٩٥٥)

FARADAY, Michael (1791-1867)

فارادِي ، مايْكل (١٧٩١-١٨٦٧)

FIZEAU, Armand-Hippolyte-Louis (1819-1896)

فيزُو ، أرْمان-هيپوليت-لـوِي (١٨١٩-١٨٩٦)

FOUCAULT, Jean-Bernard-Léon (1819-1868)

فُوكُو ، جَان-بيرْنار-لِيُو (١٨١٩-١٨٦٨)

FRESNEL, Augustin-Jean (1788-1827)

فرينل ، أوغسْطين-جَان (١٧٨٨-١٨٢٧)

GALILEI, Galileo (1564-1642)

غَاليلِي ، غاليلِيُو (١٥٦٤-١٦٤٢)

HELMHOLTZ, Hermann (Ludwig Ferdinand) (1821-1894)

هيلمْهُولْتز ، هيرْمان (لُودْفيغ فيرْدِنانْد) (١٨٢١-١٨٩٤)

HOOKE, Robert (1635-1703)

هُوك ، رُوبِرْت (١٦٣٥-١٧٠٣)

HUYGENS, Christiaan (1629-1695)

هُويْغِنْز ، كريسْتِيان (١٦٢٩-١٦٩٥)

IBN AL-HAYTHAM, [Alhazen], Abū 'Alī Al-Ḥassan (*c.* 965-1038)

ابْن الهَيْثَم ، أبو علي [محمّد بن] الحسن (٣٥٤-٤٣٠هـ/ ٩٦٥-١٠٣٨م)

JOULE, James Prescott (1819-1889)

جُول ، جيمْس بريسْكُوت (١٨١٨-١٨٨٩)

LAVOISIER, Antoine-Laurent (1743-1794)

لافْوَازييه ، أنْطوَان - لُوَران (١٧٤٣-١٧٩٤)

LORENTZ, Hendrik Antoon (1853-1928)

لُورِنْتز ، هِنْدريك أنْطُون (١٨٥٣-١٩٢٨)

MAXWELL, James Clark (1831-1879)

مَاكْسوِيل ، جيمْس كلارْك (١٨٣١-١٨٩٧)

MAYER, Julius Robert von (1814-1878)

مَايِر ، يُولْيُوس روبِرت فُون (١٨١٤-١٨٧٨)

MICHELSON, Albert Abraham (1852-1931)

ميكِلْصُن ، ألبرْت أبراهام (١٨٥٢-١٩٣١)

MORLEY, Edward Wiliams (1838-1923)

مُورْلي ، إدْوَارْد وليمْز (١٨٣٨-١٩٢٣)

MOZART, Wolfgang Amadeus (1756-1891)

مُوتْزَارْت ، ڤُولفْغَانْغ أمَاديُوس (١٧٥٦-١٧٩١)

NEWTON, Sir Isaac (1642-1727)

نيوتُن ، سير اسْحق (١٦٤٢-١٧٢٧)

POINCARE´, [Jules-] Henri (1854-1912)

پُونْكَاريه ، (جول-) هِنْري (١٨٥٤-١٩١٢)

PTOLEMY [Claudius Ptalemaeus] (*fl.* 2nd century AD)

بَطْلَمْيُوس [القَلُوذِيّ] (صَعِدَ نَجْمُهُ في القَرْنِ الميلاديّ الثّاني)

YOUNG, Thomas (1773-1829)

يَنْغ ، تُوماس (١٧٧٣-١٨٢٩)

المُلحَقُ الرّابع (٤)

التّرجمةُ الإنكليزيّة الأمينة لورقةِ آيْنشتايْن المشهورةِ في النّسْبيّةِ الخاصّة* :

“Zur Elektrodynamik bewegter Körper”

["On the Electrodynamics of Moving Bodies":]

[«في التّحريك الكهْربائيّ (الدّيناميكا الكهْربائيّة) للأجسامِ المتحرّكة»]

Annalen der Physik **17**, 891-921 (1905)

---

* عن كتاب :

Miller, Arthur I.

1981 *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1981), pp. 391-415.

- في هذه التّرجمة ، أُبقيت الرّموزُ العِلْميّةُ تماماً كما أوْرَدَها آينشتايْن في عملِهِ الأصليّ ؛ باستثناءِ رمْزِهِ V لسُرعةِ الضّوْءِ في الفراغ ، الذي غُيِّرَ إلى الرّمزِ المتعارَفِ عليه دَوْليّاً ، c .

- الحواشي السّفليّة المذّيلةُ بالحرفيْن (A.S.) أضافَها آرنولد زُومِرفِلْد Arnold Sommerfeld ؛ وتلك المذيّلةُ بالأحرف (A.I.M.) أضافَها المترجِمُ آرثر مِيلِر Arthur I. Miller . أمّا الحواشي الأربعُ الأُخرى فهي لآيْنشتايْن نفسِه .

ON THE ELECTRODYNAMICS OF MOVING BODIES

By A. Einstein

That Maxwell's electrodynamics—the way in which it is usually understood—when applied to moving bodies, leads to asymmetries which do not appear to be inherent in the phenomena is well known. Consider, for example, the reciprocal electrodynamic interaction of a magnet and a conductor. The observable phenomenon here depends only on the relative motion of the conductor and the magnet, whereas the customary conception draws a sharp distinction between the two cases in which either the one or the other of these bodies is in motion. For if the magnet is in motion and the conductor at rest, there arises in the neighborhood of the magnet an electric field with a certain definite energy, producing a current at the places where parts of the conductor are situated. But if the magnet is at rest and the conductor in motion, no electric field arises in the neighborhood of the magnet. In the conductor, however, we find an electromotive force, to which in itself there is no corresponding energy, but which gives rise—assuming equality of relative motion in the two cases discussed—to electric currents of the same path and intensity as those produced by the electric forces in the former case.

Examples of this sort, together with the unsuccessful attempts to discover any motion of the earth relatively to the "light medium," lead to the conjecture that to the concept of absolute rest there correspond no properties of the phenomena, neither in mechanics, nor in electrodynamics, but rather that as has already been shown to quantities of the first order, for every reference system in which the laws of mechanics are valid*, the laws of electrodynamics and optics are also valid.

We will raise this conjecture (whose intent will from now on be referred to as the "Principle of Relativity") to a postulate, and moreover introduce another postulate, which is only apparently irreconcilable with the former: light is always propagated in empty space with a definite velocity c which is independent of the state of motion of the emitting body. These two postulates suffice in order to obtain a simple and consistent theory of the electrodynamics of moving bodies taking as a basis Maxwell's theory for bodies at rest. The introduction of a "luminiferous ether" will prove to be superfluous because the view here to be developed will introduce neither an "absolutely resting space" provided with special properties, nor associate a velocity-vector with a point of empty space in which electromagnetic processes occur.

The theory to be developed is based—like all electrodynamics—on the kinematics of the rigid body, since the assertions of any such theory concern

---

[* The preceeding memoir by Lorentz was not at this time known to the author. (A.S.)]

the relationships between rigid bodies (coordinate systems), clocks, and electromagnetic processes. Insufficient consideration of this circumstance is the root of the difficulties with which the electrodynamics of moving bodies presently has to contend.

I. KINEMATICAL PART

§1. *Definition of Simultaneity*

Let us consider a coordinate system in which the equations of Newtonian mechanics hold.* For precision of demonstration and to distinguish this coordinate system verbally from others which will be introduced later, we call it the "resting system."

If a material point is at rest relatively to this coordinate system, its position can be defined relative to it by rigid measuring rods employing the methods of Euclidean geometry, and can be expressed in Cartesian coordinates.

If we wish to describe the *motion* of a material point, we give the values of its coordinates as functions of the time. Now we must bear carefully in mind that a mathematical description of this kind has no physical meaning unless we are quite clear as to what we will understand by "time". We have to take into account that all our judgments in which time plays a role are always judgments of *simultaneous events*. If, for instance, I say, "That train arrives here at 7 o'clock," I mean something like this: "The pointing of the small hand of my watch to 7 and the arrival of the train are simultaneous events."**

It might appear possible that all the difficulties concerning the definition of "time" can be overcome by substituting "the position of the small hand of my watch" for "time." In fact such a definition is satisfactory when we are concerned with defining a time exclusively for the place where the watch is located; but it is no longer satisfactory when we have to connect in time series of events occurring at different places, or – what comes to the same thing – to evaluate the times of events occurring at places remote from the watch. We could in principle content ourselves to time events by using an observer located at the origin of the coordinate system, and equipped with a clock, who coordinates the arrival of the light signal originating from the event to be timed and traveling to his position through empty space, to be timed with the hands of his clock. Yet as we know from experience, this coordination has the disadvantage that it is not independent of the standpoint of the observer with the clock. We arrive at a much more practical arrangement by means of the following considerations.

[* i.e. to the first approximation. (A.S.)]

** We shall not here discuss the inexactitude which lurks in the concept of simultaneity of two events at (approximately) the same place, which must be removed through introducing an abstract concept.

If at the point A of space there is a clock, an observer at A can time the events in the immediate vicinity of A by coordinating the positions of the hands which are simultaneous with these events. If there is at the space point B another clock – and we wish to add, "a clock being of exactly the same characteristics as the one at A" – then it is possible for an observer at B to time the events in the immediate neighborhood of B. But, without further definitions it is not possible to compare, in respect with time, an event at A with an event at B. Thus far we have defined only an "A time" and a "B time", but no common "time" for A and B. The latter time can now be defined by requiring that by definition the "time" necessary for light to travel from A to B be identical to the "time" necessary to travel from B to A. Let a ray of light start at the "A time" t_A from A toward B, let it at the "B time" t_B be reflected at B in the direction of A, and arrive again at A at the "A time" t'_A. The two clocks run in synchronization by definition if

$$t_B - t_A = t'_A - t_B. \qquad [\S 1.1]$$

We assume this definition of synchronization to be free of any possible contradictions, applicable to arbitrarily many points, and that the following relations are universally valid: –

1. If the clock at B synchronizes with the clock at A, the clock at A synchronizes with the clock at B.
2. If the clock at A synchronizes with the clock at B and also with the clock at C, the clocks at B and C also synchronize with each other.

Thus with the help of certain (imaginary) physical experiments we have defined what is to be understood by synchronous stationary clocks located at different places, and have clearly obtained a definition of "simultaneous," or "synchronous," and of "time." The "time" of an event is the reading simultaneous with the event of a clock at rest and located at the position of the event, this clock being synchronous, and indeed synchronous for all time determinations, with a specified clock at rest.

In addition, in agreement with experience we further require that the quantity

$$\frac{2AB}{t'_A - t_A} = c, \qquad [\S 1.2]$$

be a universal constant (the velocity of light in empty space).

It is essential to have time defined by means of clocks at rest in a resting system, and the time now defined being appropriate to the resting system we call "the time of the resting system."

§2. *On the Relativity of Lengths and Times*

The following considerations are based on the principle of relativity and on the principle of the constancy of the velocity of light. We define these two principles thus –

1. The laws by which the states of physical systems undergo changes are independent of whether these changes of state are referred to one or the other of two coordinate systems moving relatively to each other in uniform translational motion.

2. Any ray of light moves in the "resting" coordinate system with the definite velocity c, which is independent of whether the ray was emitted by a resting or by a moving body. Consequently,

$$\text{velocity} = \frac{\text{light path}}{\text{time interval}}$$

where time interval is to be understood in the sense of the definition in §1.

Consider a rigid rod at rest whose length is l when measured by a measuring-rod which is also at rest. We now imagine the axis of the rod lying along the x-axis of the resting coordinate system, and that a uniform motion of parallel translation with velocity v along the x-axis in the direction of increasing x is then imparted to the rod. We now inquire as to the length of the *moving* rod, which we imagine to be determined by means of the following two operations:—

(a) The observer moves together with the given measuring-rod and the rod to be measured, and measures the length of the rod directly by superposing the measuring-rod, in just the same way as if the rod to be measured, observer and measuring rod were at rest.

(b) By means of clocks at rest set up in the resting system and synchronized in accordance with §1, the observer ascertains at what points of the resting system the two ends of the rod to be measured are located at a definite time t. The distance between these two points, measured by the measuring-rod already employed, which in this case is at rest, is also a length which may be designated "the length of the rod."

According to the principle of relativity the length to be discovered by the operation (a)—we will call it "the length of the rod in the moving system"—must be equal to the length l of the rod at rest.

The length to be discovered by the operation (b) we will call "the length of the (moving) rod in the resting system," which we shall determine on the basis of our two principles. We shall find that it differs from l.

Current kinematics assumes tacitly that the lengths determined by these two operations are precisely equal, or in other words, that a moving rigid body at the instant of time t may in geometrical respects be perfectly represented by *the same* body *at rest* in a definite position.

We imagine further that at the two ends A and B of the rod, clocks are placed which synchronize with the clocks of the resting system—that is, that their indications correspond at any instant to the "time of the resting system" at the places where they happen to be. Consequently these clocks are "synchronous in the resting system."

We imagine further that with each clock there is a moving observer, and that these observers apply to both clocks the criterion established in §1 for the synchronization of two clocks. Let a ray of light depart from A at the time* t_A, let it be reflected at B at the time t_B, and reach A again at the time t'_A. Taking into consideration the principle of the constancy of the velocity of light we find that

$$t_B - t_A = \frac{r_{AB}}{c - v} \quad \text{and} \quad t'_A - t_B = \frac{r_{AB}}{c + v}$$

where r_{AB} denotes the length of the moving rod—measured in the resting system. Observers moving with the moving rod would thus find that the two clocks were not synchronous, while observers in the resting system would declare the clocks to be synchronous.

Thus we see that we can attribute no *absolute* meaning to the concept of simultaneity, but that two events which, examined from a coordinate system, are simultaneous, can no longer be interpreted as simultaneous events when examined from a system which is in motion relatively to that system.

§3. Theory of the Transformation of Coordinates and Times from a Resting System to another System in Uniform Motion of Translation Relatively to the Former

Let us in "resting" space take two systems of coordinates, i.e., two systems, each of three rigid material lines, perpendicular to one another, and originating from a point. Let the X-axes of the two systems coincide, and their Y- and Z-axes, respectively, be parallel. Let each system be provided with a rigid measuring-rod and a number of clocks, and let the two measuring-rods, and likewise all the clocks of the two systems, be in all respects identical.

Now to the origin of one of the two systems (k) let a (constant) velocity v be imparted in the direction of the increasing x of the other resting system (K), and let this velocity be communicated to the coordinate axes, the relevant measuring-rod, and the clocks. To any time t of the resting system K there then will correspond a definite position of the axes of the moving system, and from reasons of symmetry we are entitled to assume that the motion of k may be such that the axes of the moving system are at the time t (this "t" always denotes a time of the resting system) parallel to the axes of the resting system.

We now imagine space to be measured from the resting system K by means of the measuring-rod at rest, and also from the moving system k by means of the measuring-rod moving with it; thus we determine the coordinates x, y, z, and ξ, η, ζ, respectively. Further, let the time t of the resting system be determined for all points thereof at which there are clocks by means of light

* "Time" here denotes "time of the resting system" and also "position of hands of the moving clock located at the place under discussion."

signals in the manner indicated in §1. Similarly let the time τ of the moving system be determined for all points of the moving system at which there are clocks at rest relatively to that system by applying the method, given in §1, of exchanging light signals between the points at which the latter clocks are located.

To any system of values x, y, z, t, which completely defines the place and time of an event in the resting system, there belongs a system of values ξ, η, ζ, τ, determining that event relatively to the system k, and our task is now to find the system of equations connecting these quantities.

In the first place it is clear that the equations must be *linear* on account of the properties of homogeneity which we attribute to space and time.

If we set $x' = x - vt$, it is clear that a point at rest in the system k belongs to a system of values x', y, z, independent of time. We first define τ as a function of x', y, z, and t. To do this we have to express in equations that τ is nothing else than the collection of the data of clocks at rest in system k, which have been synchronized according to the rule given in §1.

From the origin of system k let a ray be emitted at the time τ_0 along the X-axis to x', and at the time τ_1 be reflected back to the coordinate origin, arriving there at the time τ_2; thus we must have $\frac{1}{2}(\tau_0 + \tau_2) = \tau_1$, or, by inserting the arguments of the function τ and applying the principle of the constancy of the velocity of light in the resting system: –

$$\frac{1}{2}\left[\tau(0, 0, 0, t) + \tau\left(0, 0, 0, t + \frac{x'}{c - v} + \frac{x'}{c + v}\right)\right] = \tau\left(x', 0, 0, t + \frac{x'}{c - v}\right). \tag{[§3.1]}$$

Hence, if x' be chosen infinitesimally small,

$$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{c - v} + \frac{1}{c + v}\right)\frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial x'} + \frac{1}{c - v}\frac{\partial \tau}{\partial t}, \tag{[§3.2]}$$

or

$$\frac{\partial \tau}{\partial x'} + \frac{v}{c^2 - v^2}\frac{\partial \tau}{\partial t} = 0. \tag{[§3.3]}$$

It is to be noted that instead of the origin of the coordinates we might have chosen any other point for the point of origin of the ray, and the equation just obtained is therefore valid for all values of x', y, z.

A similar analysis – applied to the H- and Z-axes* – taking into account that when considered from the resting system light propagates along these axes with the velocity $\sqrt{(c^2 - v^2)}$, yields the results

[* Einstein's letters H and Z are the Greek upper case symbols for eta and zeta, and refer to axes in the system k. For consistency in notation, in line 39 Einstein should have employed Ξ instead of X. Since in line 90 below appears Ξ, then his first use of X was an oversight. (A.I.M.)]

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = 0, \qquad \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0.$$

Since τ is a *linear* function, it follows from these equations that

$$\tau = a\left(t - \frac{v}{c^2 - v^2}x'\right) \qquad [§3.4]$$

where a is a function $\phi(v)$ at present unknown, and where for brevity it is assumed that at the origin of k, $\tau = 0$, when $t = 0$.

With the help of this result we easily determine the quantities ξ, η, ζ by expressing in equations that light (as required by the principle of the constancy of the velocity of light, in combination with the principle of relativity) is also propagated with velocity c when measured in the moving system. For a ray of light emitted at the time $\tau = 0$ in the direction of the increasing ξ

$$\xi = c\tau \quad \text{or} \quad \xi = ac\left(t - \frac{v}{c^2 - v^2}x'\right). \qquad [§3.5]$$

But the ray moves relatively to the initial point of k, when measured in the resting system, with the velocity $c - v$, so that

$$\frac{x'}{c - v} = t. \qquad [§3.6]$$

If we insert this value of t in the equation for ξ, we obtain

$$\xi = a\frac{c^2}{c^2 - v^2}x'. \qquad [§3.7]$$

In an analogous manner we find, by considering rays moving along the two other axes, that

$$\eta = c\tau = ac\left(t - \frac{v}{c^2 - v^2}x'\right) \qquad [§3.8]$$

when

$$\frac{y}{\sqrt{(c^2 - v^2)}} = t, \qquad x' = 0. \qquad [§3.9]$$

Thus

$$\eta = a\frac{c}{\sqrt{(c^2 - v^2)}}y \quad \text{and} \quad \zeta = a\frac{c}{\sqrt{(c^2 - v^2)}}z. \qquad [§3.10]$$

Substituting for x' its value, we obtain

$$\tau = \phi(v)\beta(t - vx/c^2), \qquad [§3.11]$$

$$\xi = \phi(v)\beta(x - vt), \quad [\S 3.12]$$

$$\eta = \phi(v)y, \quad [\S 3.13]$$

$$\zeta = \phi(v)z, \quad [\S 3.14]$$

where

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}}, \quad [\S 3.15]$$

and ϕ is an as yet unknown function of v. If no assumption whatever be made as to the initial position of the moving system and as to the zero point of τ, an additive constant is to be placed on the right side of each of these equations.

We now have to prove that any ray of light, measured in the moving system, is propagated with the velocity c, if, as we have assumed, this is the case in the resting system; for we have not as yet furnished the proof that the principle of the constancy of the velocity of light is compatible with the principle of relativity.

At the time $t = \tau = 0$, when the coordinate origins of the two systems coincide, let a spherical wave be emitted from a source at the origin of both systems, and be propagated with the velocity c in system K. If (x, y, z) is a point just reached by this wave, then

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2. \quad [\S 3.16]$$

Transforming this equation with the aid of our equations of transformation we obtain after a simple calculation

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = c^2\tau^2. \quad [\S 3.17]$$

The wave under consideration is therefore no less a spherical wave with velocity of propagation c when considered in the moving system. Consequently our two fundamental principles are compatible with each other.*

In the equations of transformation which have been developed there enters an unknown function ϕ of v, which we will now determine.

For this purpose we introduce a third system of coordinates K′, which relatively to the system k is in a state of parallel translational motion parallel to the Ξ-axis such that its coordinate origin moves with velocity $-v$ on the Ξ-axis relative to k. At the time $t = 0$ let all three origins coincide, and when $t = x = y = z = 0$ let the time t' of the system K′ be zero. We call the coordinates, measured in the system K′, x', y', z', and by a twofold application of our transformation equations, we obtain

[* The equations of the Lorentz transformation may be more simply deduced directly from the condition that in virtue of those equations the relation $x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2$ shall have as its consequence the second relation $\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = c^2\tau^2$. (A.S.)]

$$t' = \phi(-v)\beta(-v)(\tau + v\xi/c^2) = \phi(v)\phi(-v)t, \qquad [§3.18]$$

$$x' = \phi(-v)\beta(-v)(\xi + v\tau) \quad = \phi(v)\phi(-v)x, \qquad [§3.19]$$

$$y' = \phi(-v)\eta \quad = \phi(v)\phi(-v)y, \qquad [§3.20]$$

$$z' = \phi(-v)\zeta \quad = \phi(v)\phi(-v)z. \qquad [§3.21]$$

Since the relations between x', y', z' and x, y, z do not contain the time t, the systems K and K′ are at rest with respect to one another, and it is clear that the transformation from K to K′ must be the identity transformation. Thus

$$\phi(v)\phi(-v) = 1. \qquad [§3.22]$$

We now inquire into the meaning of $\phi(v)$. We fix our attention on that part of the H-axis of system k which lies between $\xi = 0, \eta = 0, \zeta = 0$ and $\xi = 0, \eta = l, \zeta = 0$. This part of the H-axis is a rod moving perpendicularly to its axis with velocity v relatively to system K, whose ends have in K the coordinates

$$x_1 = vt, \qquad y_1 = \frac{l}{\phi(v)}, \qquad z_1 = 0 \qquad [§3.23]$$

and

$$x_2 = vt, \qquad y_2 = 0, \qquad z_2 = 0. \qquad [§3.24]$$

The length of the rod measured in K is therefore $l/\phi(v)$; and this gives us the meaning of the function $\phi(v)$. From reasons of symmetry it is now evident that the length of a given rod moving perpendicularly to its axis, measured in the resting system, can depend on only the velocity and not on the direction and the sense of the motion. Thus, the length of the moving rod measured in the resting system does not change when v and $-v$ are interchanged. Consequently $l/\phi(v) = l/\phi(-v)$, or

$$\phi(v) = \phi(-v). \qquad [§3.25]$$

It follows from this relation and the previous one that $\phi(v) = 1$, so that the transformation equations which have been found become

$$\tau = \beta(t - vx/c^2), \qquad [§3.26]$$

$$\xi = \beta(x - vt), \qquad [§3.27]$$

$$\eta = y, \qquad [§3.28]$$

$$\zeta = z, \qquad [§3.29]$$

where

$$\beta = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}. \qquad [§3.30]$$

§4. *Physical Meaning of the Equations Obtained Concerning Moving Rigid Bodies and Moving Clocks*

We consider a rigid sphere* of radius R, at rest relatively to the moving system k, and whose center is at the coordinate origin of k. The equation of the surface of this sphere moving relatively to the system K with velocity v is

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = R^2. \qquad [§4.1]$$

The equation of this surface is expressed in x, y, z at the time $t = 0$ as

$$\frac{x^2}{(\sqrt{(1 - v^2/c^2)})^2} + y^2 + z^2 = R^2. \qquad [§4.2]$$

A rigid body which, measured in a state of rest, has the form of a sphere, therefore has in a state of motion – viewed from the resting system – the form of an ellipsoid of revolution with the axes

$$R\sqrt{(1 - v^2/c^2)},\ R,\ R. \qquad [§4.3]$$

Thus, whereas the Y- and Z-dimensions of the sphere (and therefore of every rigid body of arbitrary form) do not appear modified by the motion, the X dimension appears shortened in the ratio $1:\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$, i.e., the greater the value of v, the greater the shortening. For $v = c$ all moving objects – viewed from the "resting" system – shrivel up into plane figures. For velocities greater than that of light our deliberations become meaningless; we shall, however, find in what follows that the velocity of light in our theory plays the role, physically, of an infinitely great velocity.

It is clear that the same results hold good of bodies at rest in the "resting" system, viewed from a system in uniform motion.

Further, we imagine one of the clocks which are qualified to mark the time t when at rest relatively to the resting system, and the time τ when at rest relatively to the moving system, to be located at the origin of the coordinates of k, and so adjusted that it marks the time τ. What is the rate, of this clock, when viewed from the resting system?

Between the quantities, x, t and τ, which refer to the position of the clock, the equations clearly hold – and

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}}(t - vx/c^2)$$

and

$$x = vt.$$

Therefore,

* That is, a body possessing spherical form when examined at rest.

$$\tau = t\sqrt{(1 - v^2/c^2)} = t - (1 - \sqrt{(1 - v^2/c^2)})t$$

whence it follows that the time marked by the clock (viewed in the resting system) is slow by $1 - \sqrt{(1 - v^2/c^2)}$ seconds per second, or – neglecting magnitudes of fourth and higher order – by $\frac{1}{2}v^2/c^2$ seconds.

From this there ensues the following peculiar consequence. If at the points A and B of K there are stationary clocks which, viewed in the resting system, are synchronous; and if the clock at A is moved with the velocity v along the line AB to B, then on its arrival at B the two clocks no longer synchronize, but the clock moved from A to B lags behind the other which has remained at B by $\frac{1}{2}tv^2/c^2$ seconds (up to magnitudes of fourth and higher order), t being the time required to move the clock from A to B.

It is at once apparent that this result still holds good if the clock moves from A to B in any polygonal line, and also when the points A and B coincide.

If we assume that the result proved for a polygonal line is also valid for a continuously curved line, we obtain the theorem: If one of two synchronous clocks at A is moved in a closed curve with constant velocity until it returns to A, the journey lasting t seconds, then the clock that moved runs $\frac{1}{2}tv^2/c^2$ seconds slower than the one that remained at rest. Thus we conclude that a balance-clock* at the equator must go more slowly, by a very small amount, than a precisely similar clock situated at one of the poles under otherwise identical conditions.

§5. *The Theorem of Addition of Velocities*

In the system k moving along the X-axis of the system K with velocity v, let a point move in accordance with the equations

$$\xi = w_\xi \tau, \qquad \eta = w_\eta \tau, \qquad \zeta = 0,$$

where w_ξ and w_η denote constants.

Required: the motion of the point relatively to the system K. If with the help of the transformation equations developed in §3 we introduce the quantities x, y, z, t into the quations of motion of the point, we obtain

$$x = \frac{w_\xi + v}{1 + vw_\xi/c^2} t,$$

$$y = \frac{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}}{1 + vw_\xi/c^2} w_\eta t,$$

$$z = 0.$$

Thus the law of the parallelogram of velocities is valid according to our theory

[* Not a pendulum-clock, which is physically a system to which the earth belongs. This case had to be excluded. (A.S.)]

only to a first approximation. We set*

$$V^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2,$$

$$w^2 = w_\xi^2 + w_\eta^2,$$

$$\alpha = \tan^{-1} w_\eta / w_\xi,$$

α is then to be looked upon as the angle between the velocities v and w. After a simple calculation we obtain

$$V = \frac{\sqrt{[(v^2 + w^2 + 2vw\cos\alpha) - (vw\sin\alpha)^2/c^2]}}{1 + vw\cos\alpha/c^2}.$$

It is worthy of remark that v and w enter into the expression for the resultant velocity in a symmetrical manner. If w also has the direction of the (Ξ-axis) we get

$$V = \frac{v + w}{1 + vw/c^2}.$$

It follows from this equation that from a composition of two velocities which are less than c, there always results a velocity less than c. For if we set $v = c - \kappa$, $w = c - \lambda$, κ and λ being positive and less than c, then

$$V = c\frac{2c - \kappa - \lambda}{2c - \kappa - \lambda + \kappa\lambda/c} < c.$$

It follows, further, that the velocity of light c cannot be altered by composition with a velocity less than that of light. For this case we obtain

$$V = \frac{c + w}{1 + w/c} = c.$$

We might also have obtained the formula for V, for the case when v and w have the same direction, by compounding two transformations in accordance with §3. If in addition to the systems K and k figuring in §3 we introduce still another system of coordinates k′ moving parallel to k, its initial point moving on the Ξ-axis with the velocity w, we obtain equations between the quantities x, y, z, t and the corresponding quantities of k′, which differ from the equations found in §3 only in that the place of "v" is taken by the quantity

$$\frac{v + w}{1 + vw/c^2};$$

[* Here the *Annalen* version contains the following typographical error:

$$\alpha = \tan^{-1} w_y / w_x$$

(A.I.M.).]

from which we see that such parallel transformations – necessarily – form a group.

We now have deduced the essential theorems of the kinematics corresponding to our two principles, and we proceed to exhibit their application to electrodynamics.

II. ELECTRODYNAMICAL PART

§6. *Transformation of the Maxwell-Hertz Equations for Empty Space. On the Nature of the Electromotive Forces Occurring in a Magnetic Field During Motion*

Let the Maxwell-Hertz equations for empty space be valid for the resting system K, so that we have

$$\frac{1}{c}\frac{\partial X}{\partial t}=\frac{\partial N}{\partial y}-\frac{\partial M}{\partial z}, \qquad \frac{1}{c}\frac{\partial L}{\partial t}=\frac{\partial Y}{\partial z}-\frac{\partial Z}{\partial y},$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial Y}{\partial z}=\frac{\partial L}{\partial z}-\frac{\partial N}{\partial x}, \qquad \frac{1}{c}\frac{\partial M}{\partial t}=\frac{\partial Z}{\partial x}-\frac{\partial X}{\partial z},$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial Z}{\partial t}=\frac{\partial M}{\partial x}-\frac{\partial L}{\partial y}, \qquad \frac{1}{c}\frac{\partial N}{\partial t}=\frac{\partial X}{\partial y}-\frac{\partial Y}{\partial x}, \qquad [§6.1]$$

where (X, Y, Z) denotes the electric-force vector and (L, M, N) the magnetic-force vector.

If we apply to these equations the transformation developed in §3, by referring the electromagnetic processes to the coordinate system there introduced, moving with the velocity v, we obtain the equations

$$\frac{1}{c}\frac{\partial X}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial \eta}\left\{\beta\left(N-\frac{v}{c}Y\right)\right\}-\frac{\partial}{\partial \zeta}\left\{\beta\left(M+\frac{v}{c}Z\right)\right\}, \qquad [§6.2]$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial \tau}\left\{\beta\left(Y-\frac{v}{c}N\right)\right\}=\frac{\partial L}{\partial \zeta}-\frac{\partial}{\partial \xi}\left\{\beta\left(N-\frac{v}{c}Y\right)\right\}, \qquad [§6.3]$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial \tau}\left\{\beta\left(Z+\frac{v}{c}M\right)\right\}=\frac{\partial}{\partial \xi}\left\{\beta\left(M+\frac{v}{c}Z\right)\right\}-\frac{\partial L}{\partial \eta}, \qquad [§6.4]$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial L}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial \zeta}\left\{\beta\left(Y-\frac{v}{c}N\right)\right\}-\frac{\partial}{\partial \eta}\left\{\beta\left(Z+\frac{v}{c}M\right)\right\}, \qquad [§6.5]$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial \tau}\left\{\beta\left(M+\frac{v}{c}Z\right)\right\}=\frac{\partial}{\partial \xi}\left\{\beta\left(Z+\frac{v}{c}M\right)\right\}-\frac{\partial X}{\partial \zeta}, \qquad [§6.6]$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial \tau}\left\{\beta\left(N-\frac{v}{c}Y\right)\right\}=\frac{\partial X}{\partial \eta}-\frac{\partial}{\partial \xi}\left\{\beta\left(Y-\frac{v}{c}N\right)\right\}, \qquad [§6.7]$$

where

$$\beta = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}.$$

Now the principle of relativity requires that if the Maxwell-Hertz equations for empty space hold in system K, they also hold in system k. In other words, the vectors of the electric and the magnetic force (X', Y', Z') and (L', M', N') of the moving system k, which are defined by their ponderomotive effects on electric or magnetic substances, respectively, satisfy the following equations: –

$$\frac{1}{c}\frac{\partial X'}{\partial \tau} = \frac{\partial N'}{\partial \eta} - \frac{\partial M'}{\partial \zeta}, \quad \frac{1}{c}\frac{\partial L'}{\partial \tau} = \frac{\partial Y'}{\partial \zeta} - \frac{\partial Z'}{\partial \eta},$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial Y'}{\partial \tau} = \frac{\partial L'}{\partial \zeta} - \frac{\partial N'}{\partial \xi}, \quad \frac{1}{c}\frac{\partial M'}{\partial \tau} = \frac{\partial Z'}{\partial \xi} - \frac{\partial X'}{\partial \zeta},$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial Z'}{\partial \tau} = \frac{\partial M'}{\partial \xi} - \frac{\partial L'}{\partial \eta}, \quad \frac{1}{c}\frac{\partial N'}{\partial \tau} = \frac{\partial X'}{\partial \eta} - \frac{\partial Y'}{\partial \xi}.$$

Evidently the two systems of equations found for system k must express exactly the same thing, since both systems of equations are equivalent to the Maxwell-Hertz equations for system K. Since, further, the equations of the two systems agree, with the exception of the symbols for the vectors, it follows that the functions occurring in the systems of equations at corresponding places must agree, with the exception of a factor $\psi(v)$, which is common for all functions of the one system of equations, and is independent of ξ, η, ζ and τ but depends upon v. Thus we have the relations

$$X' = \psi(v)X, \qquad L' = \psi(v)L,$$

$$Y' = \psi(v)\beta\left(Y - \frac{v}{c}N\right), \quad M' = \psi(v)\beta\left(M + \frac{v}{c}Z\right),$$

$$Z' = \psi(v)\beta\left(Z + \frac{v}{c}M\right), \quad N' = \psi(v)\beta\left(N - \frac{v}{c}Y\right).$$

If we now form the reciprocal of this system of equations, firstly by solving the equations just obtained, and secondly by applying the equations to the inverse transformation (from k to K), which is characterized by the velocity $-v$, it follows, when we consider that the two systems of equations thus obtained must be identical, that $\psi(v)\psi(-v) = 1$. Further, from reasons of symmetry* $\psi(v) = \psi(-v)$, and therefore

$$\psi(v) = 1,$$

* If, for example, $X = Y = Z = L = M = 0$, and $N \neq 0$, then from reasons of symmetry it is clear that when v changes sign without changing its numerical value, Y' must also change sign without changing its numerical value.

and our equations assume the form

$$X' = X, \qquad L' = L,$$

$$Y' = \beta\left(Y - \frac{v}{c}N\right), \quad M' = \beta\left(M + \frac{v}{c}Z\right),$$

$$Z' = \beta\left(Z + \frac{v}{c}M\right), \quad N' = \beta\left(N - \frac{v}{c}Y\right).$$

As to the interpretation of these equations we make the following remarks: Let a point charge of electricity have the magnitude "one" when measured in the resting system K, i.e., let it when at rest in the resting system exert a force of one dyne upon an equal quantity of electricity at a distance of one cm. By the principle of relativity this electric charge is also of the magnitude "one" when measured in the moving system. If this quantity of electricity is at rest relatively to the resting system, then by definition the vector (X, Y, Z) is equal to the force acting upon it. If the quantity of electricity is at rest relatively to the moving system (at least at the relevant instant), then the force acting upon it, measured in the moving system, is equal to the vector (X', Y', Z'). Consequently the first three equations above allow themselves to be expressed in words in the following two ways:—

1. If a unit electric point charge is moving in an electromagnetic field, there acts upon it, in addition to the electric force, an "electromotive force" which, if we neglect the terms multiplied by the second and higher powers of v/c, is equal to the vector-product of the velocity of the charge and the magnetic force, divided by the velocity of light. (Old manner of expression.)

2. If a unit electric point charge is moving in an electromagnetic field, the force acting upon it is equal to the electric force which is present at the position of this unit charge, and which we determine by transformation of the field to a coordinate system at rest relatively to the electrical unit charge. (New manner of expression.)

The analogy holds with "magnetomotive forces." We see that in the developed theory the electromotive force plays only the part of an auxiliary concept, which owes its introduction to the circumstance that electric and magnetic forces do not exist independently of the state of motion of the coordinate system.

Furthermore it is clear that the asymmetry mentioned in the introduction as arising when we consider the currents produced by the relative motion of a magnet and a conductor, now disappears. Likewise, questions as to the "seat" of electrodynamic electromotive forces (unipolar machines) become meaningless.

§7. *Theory of Doppler's Principle and of Aberration*

In the system K, very far from the coordinate origin, let there be a source of electrodynamic waves, which in a part of space containing the coordinate

origin may be represented to a sufficient degree of approximation by the equations

$$X = X_0 \sin \Phi, \qquad L = L_0 \sin \Phi,$$
$$Y = Y_0 \sin \Phi, \qquad M = M_0 \sin \Phi,$$
$$Z = Z_0 \sin \Phi, \qquad N = N_0 \sin \Phi,$$

where

$$\Phi = \omega \left\{ t - \frac{1}{c}(lx + my + nz) \right\}.$$

Here (X_0, Y_0, Z_0) and (L_0, M_0, N_0) are the vectors defining the amplitude of the wave-train, and l, m, n the direction-cosines of the wave-normals. We seek the characteristics of these waves, when they are examined by an observer at rest in the moving system k.

Applying the transformation equations found in §6 for electric and magnetic forces, and those found in §3 for the coordinates and the time, we obtain directly

$$X' = X_0 \sin \Phi', \qquad L' = L_0 \sin \Phi',$$
$$Y' = \beta(Y_0 - vN_0/c) \sin \Phi', \qquad M' = \beta(M_0 + vZ_0/c) \sin \Phi',$$
$$Z' = \beta(Z_0 + vM_0/c) \sin \Phi', \qquad N' = \beta(N_0 - vY_0/c) \sin \Phi',$$
$$\Phi' = \omega' \left\{ \tau - \frac{1}{c}(l'\xi + m'\eta + n'\zeta) \right\}$$

where

$$\omega' = \omega\beta(1 - lv/c),$$
$$l' = \frac{l - v/c}{1 - lv/c},$$
$$m' = \frac{m}{\beta(1 - lv/c)},$$
$$n' = \frac{n}{\beta(1 - lv/c)}.$$

From the equation for ω' it follows that if an observer is moving with velocity v relatively to an infinitely distant source of light of frequency ν, in such a way that the connecting line "light source-observer" makes the angle ϕ with the velocity of the observer referred to a coordinate system which is at rest relatively to the source of light, the frequency ν' of the light perceived by the observer is given by the equation

$$\nu' = \nu \frac{1 - \cos\phi \cdot v/c}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}}.$$

This is Doppler's principle for arbitrary velocities. When $\phi = 0$ the equation assumes the simple form

$$\nu' = \nu \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}.$$

We see that, in contrast with the customary view, when $v = -c$, $\nu' = \infty$.*

If we call the angle between the wave-normal (direction of the ray) in the moving system and the connecting line "light source-observer" ϕ', the equation for l' becomes

$$\cos\phi' = \frac{\cos\phi - v/c}{1 - \cos\phi \cdot v/c}.$$

This equation expresses the law of aberration in its most general form. If $\phi = \frac{1}{2}\pi$, the equation becomes simply

$$\cos\phi' = -v/c.$$

We still have to find the amplitude of the waves, as it appears in the moving system. If we call the amplitude of the electric or magnetic force A or A' respectively, accordingly as it is measured in the resting system or in the moving system, we obtain

$$A'^2 = A^2 \frac{(1 - \cos\phi \cdot v/c)^2}{1 - v^2/c^2},$$

for $\phi = 0$ this equation becomes

$$A'^2 = A^2 \frac{1 - v/c}{1 + v/c}.$$

From the equations developed here, it follows that to an observer approaching a source of light with the velocity c, this source of light must appear of infinite intensity.

[* Here the *Annalen* version has the following typographical error: "for $v = -\infty$, $\nu = \infty$." In the desk copy of Einstein's own set of reprints, which was presented to Professor Gerald Holton at the completion of his work on a *catalogue raisonné* of the Einstein papers in August 1964, there are some additions and corrections in Einstein's own hand. On this page the corrections consist of the deletion of the $-\infty$ (in $v = -\infty$) and its replacement by V which is the symbol that Einstein used for the velocity of light in vacuum c; and the replacement in line 17 of the phrase "connecting line 'light source-observer'" by the phrase "direction of motion." (A.I.M.)]

§8. Transformation of the Energy of Light Rays. Theory of the Pressure of Radiation Exerted on Perfect Reflectors

Since $A^2/8\pi$ equals the energy of light per unit volume, according to the principle of relativity, we have to regard $A'^2/8\pi$ as the energy of light per unit volume in the moving system. Thus A'^2/A^2 would be the ratio of the "measured in motion" to the "measured at rest" energy of a given light complex, if the volume of a light complex were the same, whether measured in K or in k. This is, however, not the case. If l, m, n are the direction-cosines of the wave-normals of the light in the resting system, no energy passes through the surface elements of a spherical surface moving with the velocity of light: –

$$(x - lct)^2 + (y - mct)^2 + (z - nct)^2 = R^2.$$

We may say, therefore, that this surface permanently encloses the same light complex. We inquire into the amount of energy enclosed by this surface, from the viewpoint of the system k – that is, the energy of the light complex relatively to the system k.

The spherical surface – viewed in the moving system – is an ellipsoidal surface, whose equation at the time $\tau = 0$, is

$$(\beta\xi - l\beta\xi v/c)^2 + (\eta - m\beta\xi v/c)^2 + (\zeta - n\beta\xi v/c)^2 = R^2. \qquad [§8.1]$$

If S is the volume of the sphere, and S' the volume of the ellipsoid, then by a simple calculation

$$\frac{S'}{S} = \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - \cos\phi \cdot v/c}. \qquad [§8.2]$$

Thus, if we call the light energy enclosed by this surface E when it is measured in the resting system, and E' when measured in the moving system, we obtain

$$\frac{E'}{E} = \frac{A'^2 S'}{A^2 S} = \frac{1 - \cos\phi \cdot v/c}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}}, \qquad [§8.3]$$

and, when $\phi = 0$, this formula simplifies into

$$\frac{E'}{E} = \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}. \qquad [§8.4]$$

It is remarkable that the energy and the frequency of a light complex vary with the observer's state of motion in accordance with the same law.

Now let the coordinate plane $\xi = 0$ be a perfectly reflecting surface, at which the plane waves considered in the previous section are reflected. We seek the pressure of light exerted on the reflecting surface, and the direction, frequency, and intensity of the light after reflection.

Let the incident light be defined by the quantities A, $\cos\phi$, ν (referred to system K). Viewed from k the corresponding quantities are

$$A' = A\frac{1 - \cos\phi \cdot v/c}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}}, \qquad [§8.5]$$

$$\cos\phi' = \frac{\cos\phi - v/c}{1 - \cos\phi \cdot v/c}, \qquad [§8.6]$$

$$\nu' = \nu\frac{1 - \cos\phi \cdot v/c}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}}. \qquad [§8.7]$$

Referring the process to system k, we obtain for the reflected light

$$A'' = A', \qquad [§8.8]$$

$$\cos\phi'' = -\cos\phi', \qquad [§8.9]$$

$$\nu'' = \nu'. \qquad [§8.10]$$

Finally, by transforming back to the resting system K, we obtain for the reflected light*

$$A''' = A''\frac{1 + \cos\phi'' \cdot v/c}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}} = A\frac{1 - 2\cos\phi \cdot v/c + v^2/c^2}{1 - v^2/c^2}, \qquad [§8.11]$$

$$\cos\phi''' = \frac{\cos\phi'' + v/c}{1 + \cos\phi'' \cdot v/c} = -\frac{(1 + v^2/c^2)\cos\phi - 2v/c}{1 - 2\cos\phi \cdot v/c + v^2/c^2}, \qquad [§8.12]$$

$$\nu''' = \nu''\frac{1 + \cos\phi'' \cdot v/c}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}} = \nu\frac{1 - 2\cos\phi \cdot v/c + v^2/c^2}{1 - v^2/c^2}. \qquad [§8.13]$$

The energy (measured in the resting system) incident per unit time upon the unit of surface of the mirror is evidently $A^2(c\cos\phi - v)/8\pi$. The energy leaving per unit time the unit of surface of the mirror is $A'''^2(-c\cos\phi''' + v)/8\pi$. According to the principle of energy, the difference of these two expressions is the work done per unit time by the pressure of light. If we express this work as the product Pv, where P is the pressure of light, we obtain

$$P = 2 \cdot \frac{A^2}{8\pi}\frac{(\cos\phi - v/c)^2}{1 - v^2/c^2}. \qquad [§8.14]$$

In agreement with experiment and with other theories, to a first approximation we obtain

$$P = 2 \cdot \frac{A^2}{8\pi} \cdot \cos^2\phi. \qquad [§8.15]$$

* In the *Annalen* version the Eq. [§8.13] is incorrect because the part containing the frequency and angle in K has a denominator of $(1 - v/c)^2$.

All problems in the optics of moving bodies can be solved by the method here employed. The essential point is that the electric and magnetic force of the light, which is influenced by a moving body, be transformed to a coordinate system at rest relative to the body. By this means all problems in the optics of moving bodies are reduced to a series of problems in the optics of bodies at rest.

§9. *Transformation of the Maxwell-Hertz Equations when Convection-Currents are Taken into Account*

We start from the equations

$$\frac{1}{c}\left\{\frac{\partial X}{\partial t}+u_x\rho\right\}=\frac{\partial N}{\partial y}-\frac{\partial M}{\partial z}, \qquad \frac{1}{c}\frac{\partial L}{\partial t}=\frac{\partial Y}{\partial z}-\frac{\partial Z}{\partial y},$$

$$\frac{1}{c}\left\{\frac{\partial Y}{\partial t}+u_y\rho\right\}=\frac{\partial L}{\partial z}-\frac{\partial N}{\partial x}, \qquad \frac{1}{c}\frac{\partial M}{\partial t}=\frac{\partial Z}{\partial x}-\frac{\partial X}{\partial z},$$

$$\frac{1}{c}\left\{\frac{\partial Z}{\partial t}+u_z\rho\right\}=\frac{\partial M}{\partial x}-\frac{\partial L}{\partial y}, \qquad \frac{1}{c}\frac{\partial N}{\partial t}=\frac{\partial X}{\partial y}-\frac{\partial Y}{\partial x},$$

where

$$\rho=\frac{\partial X}{\partial x}+\frac{\partial Y}{\partial y}+\frac{\partial Z}{\partial z}$$

denotes 4π times the charge density, and (u_x, u_y, u_z) the velocity-vector of the charge. If we imagine the electrical substances to be coupled in an unchanging manner to small rigid bodies (ions, electrons), these equations are the electromagnetic basis of Lorentz's electrodynamics and optics of moving bodies.

Let these equations be valid in the system K, and using the transformation equations given in §§3 and 6, transform them to the system k. We then obtain the equations

$$\frac{1}{c}\left\{\frac{\partial X'}{\partial \tau}+u_\xi\rho'\right\}=\frac{\partial N'}{\partial \eta}-\frac{\partial M'}{\partial \zeta}, \qquad \frac{1}{c}\frac{\partial L'}{\partial \tau}=\frac{\partial Y'}{\partial \zeta}-\frac{\partial Z'}{\partial \eta},$$

$$\frac{1}{c}\left\{\frac{\partial Y'}{\partial \tau}+u_\eta\rho'\right\}=\frac{\partial L'}{\partial \zeta}-\frac{\partial N'}{\partial \xi}, \qquad \frac{1}{c}\frac{\partial M'}{\partial \tau}=\frac{\partial Z'}{\partial \xi}-\frac{\partial X'}{\partial \zeta},$$

$$\frac{1}{c}\left\{\frac{\partial Z'}{\partial \tau}+u_\zeta\rho'\right\}=\frac{\partial M'}{\partial \xi}-\frac{\partial L'}{\partial \eta}, \qquad \frac{1}{c}\frac{\partial N'}{\partial \tau}=\frac{\partial X'}{\partial \eta}-\frac{\partial Y'}{\partial \xi},$$

where

$$u_\xi=\frac{u_x-v}{1-u_xv/c^2},$$

$$u_\eta = \frac{u_y}{\beta(1 - u_x v/c^2)},$$

$$u_\zeta = \frac{u_z}{\beta(1 - u_x v/c^2)},$$

and

$$\rho' = \frac{\partial X'}{\partial \xi} + \frac{\partial Y'}{\partial \eta} + \frac{\partial Z'}{\partial \zeta}$$
$$= \beta(1 - u_x v/c^2)\rho.$$

Since – as follows from the addition theorem of velocities (§5) – the vector (u_ξ, u_η, u_ζ) is nothing else than the velocity of the electric substances, measured in the system k. Consequently we have proved that, on the basis of our kinematical principles, the electrodynamic foundation of Lorentz's theory of the electrodynamics of moving bodies is in agreement with the principle of relativity.

In passing, it may be remarked that the following important theorem may easily be deduced from the developed equations: If an electrically charged body is in motion anywhere in space without altering its charge when regarded from a system of coordinates moving with the body, its charge also remains constant – when viewed from the "resting" system K.

§10. Dynamics of the (Slowly Accelerated) Electron

Let there be in motion in an electromagnetic field a point particle possessing an electric charge ε (in the sequel this electrically charged particle is called an "electron"). We assume for its law of motion the following: If at a certain instant of time the electron is at rest, then in the next instant of time the electron's motion is described by the equations

$$\mu \frac{d^2x}{dt^2} = \varepsilon X,$$

$$\mu \frac{d^2y}{dt^2} = \varepsilon Y,$$

$$\mu \frac{d^2z}{dt^2} = \varepsilon Z,$$

where x, y, z denote the electron's coordinates, and μ the mass of the electron, as long as its motion is slow.

Now, secondly, let the velocity of the electron at a given instant of time be v. We seek the electron's law of motion in the immediately following instant of time.

Without loss of generality, we may and will assume that the electron, at the moment when we focus our attention on it, is at the coordinate origin, and moves with the velocity v along the X-axis of the system K. It is then clear that at the designated instant ($t = 0$) the electron is at rest relatively to a coordinate system k which is in motion with a velocity v parallel to the X-axis.

From the above assumption, in combination with the principle of relativity, it is clear that in the immediately following time (for small values of t) the electron, considered from the system k, moves in accordance with the equations

$$\mu \frac{d^2\xi}{d\tau^2} = \varepsilon X',$$

$$\mu \frac{d^2\eta}{d\tau^2} = \varepsilon Y',$$

$$\mu \frac{d^2\zeta}{d\tau^2} = \varepsilon Z',$$

in which the symbols ξ, η, ζ, τ, X', Y', Z' refer to the system k. If, further, we decide that when $t = x = y = z = 0$ then $\tau = \xi = \eta = \zeta = 0$, the transformation equations of §§3 and 6 hold, so that we have

$$\xi = \beta(x - vt), \quad \eta = y, \quad \zeta = z, \quad \tau = \beta(t - vx/c^2),$$

$$X' = X, \quad Y' = \beta(Y - vN/c), \quad Z' = \beta(Z + vM/c).$$

With the help of these equations we transform the above equations of motion from system k to system K, and obtain

$$\left.\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{\varepsilon}{\mu\beta^3} X, \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= \frac{\varepsilon}{\mu\beta}\left(Y - \frac{v}{c}N\right), \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= \frac{\varepsilon}{\mu\beta}\left(Z + \frac{v}{c}M\right) \end{aligned}\right\} \quad \cdots \text{(A)}$$

Taking the customary point of view we now inquire as to the "longitudinal" and the "transverse" mass of the moving electron. We write the equations (A) in the form

$$\mu\beta^3 \frac{d^2x}{dt^2} = \varepsilon X = \varepsilon X',$$

$$\mu\beta^2 \frac{d^2y}{dt^2} = \varepsilon\beta\left(Y - \frac{v}{c}N\right) = \varepsilon Y',$$

$$\mu\beta^2 \frac{d^2 z}{dt^2} = \varepsilon\beta\left(Z + \frac{v}{c} M\right) = \varepsilon Z',$$

and remark firstly that $\varepsilon X'$, $\varepsilon Y'$, $\varepsilon Z'$ are the components of the ponderomotive force acting upon the electron, as viewed in a system moving at this moment with the same velocity as the electron. (This force might be measured, for example, by a spring balance at rest in the last-mentioned system.) Now if we call this force simply "the force acting upon the electron,"* and maintain the equation – mass × acceleration = force – and if we also decide that the accelerations are to be measured in the resting system K, we obtain from the above equations

$$\text{Longitudinal mass} = \frac{\mu}{(\sqrt{1 - v^2/c^2})^3},$$

$$\text{Transverse mass} = \frac{\mu}{1 - v^2/c^2}.$$

Naturally, with a different definition of force and acceleration we would obtain other values for the masses. This shows us that in comparing different theories of the motion of the electron we must proceed very cautiously.

We remark that these results as to the mass are also valid for ponderable material points, because a ponderable material point can be made into an electron (in our sense of the word) by the addition of an *arbitrarily small* electric charge.

Next we determine the electron's kinetic energy. If an electron that was initially at rest at the coordinate origin of the system K moves along the X-axis under the influence of an electrostatic force X, it is clear that the energy obtained from the electrostatic field is $\int \varepsilon X\,dx$. As the electron is to be slowly accelerated, and consequently may not emit any energy in the form of radiation, the energy obtained from the electrostatic field must be equal to the electron's energy of motion W. Bearing in mind that during the whole process of motion which we are considering, the first of the equations (A) applies, we obtain

$$W = \int \varepsilon X\,dx = \mu \int_0^v \beta^3 v\,dv$$

$$= \mu c^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right\}.$$

[* The definition of force here given is not advantageous, as was first shown by M. Planck. It is more to the point to define force in such a way that the laws of momentum and energy assume the simplest form. (A.S.)]

Thus, when $v = c$, W becomes infinite. Velocities greater than that of light have — as in our previous results — no possibility of existence.

This expression for the kinetic energy must also, by virtue of the argument stated above, apply to ponderable masses as well.

We will now enumerate the properties of the electron's motion which result from the system of equations (A), and are accessible to experiment.

1. From the second equation of the system (A) it follows that when $Y = Nv/c$, an electric force Y and a magnetic force N have an equally strong deflective action on an electron moving with the velocity v. Thus we see that it is possible by our theory to determine the velocity of the electron from the ratio of the magnetic deflection A_m to the electric deflection A_e, for any velocity, by applying the law

$$\frac{A_m}{A_e} = \frac{v}{c}.$$

This relationship may be tested experimentally, since the velocity of the electron can be directly measured, e.g. by means of rapidly oscillating electric and magnetic fields.

2. From the derivation for the electron's kinetic energy, it follows that between the potential difference traversed and the acquired velocity v of the electron there must be the relationship

$$P = \int X\,dx = \frac{\mu}{\varepsilon} c^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right\}.$$

3. We calculate the radius of curvature R of the electron's path when a magnetic force N is present (the only deflective force) acting perpendicularly to the electron's velocity. From the second of the equations (A) we obtain

$$-\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{v^2}{R} = \frac{\varepsilon}{\mu}\frac{v}{c}N\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

or

$$R = \frac{\mu c^2}{\varepsilon} \cdot \frac{v/c}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}} \cdot \frac{1}{N}.$$

These three relationships are a complete expression for the laws according to which, by the theory here advanced, the electron must move.

In conclusion I wish to say that in working at the problem here dealt with I have had the loyal assistance of my friend and colleague M. Besso, and that I am indebted to him for several valuable suggestions.

□

المُلحَقُ الخامس (٥)

المَصادرُ و المَرَاجع

أ) المَرْجِعيّة (البِبْليُوغْرافْيَا) BIBLIOGRAPHY

ب) مراجعُ مُخْتارَةٌ

BIBLIOGRAPHY *(أ) المَرْجعيّة (البِبْليُوغرافْيا)

Primary Sources المصادرُ الأوّليّة

Abraham, Max (1875-1922)
- 1902a Dynamik des Electrons, *Göttinger Nachr.*, 20-41 (1902).
- 1902b Prinzipien der Dynamik des Elektrons, *Phys. Z.*, *4*, 57-63 (1902).
- 1903 Prinzipien der Dynamik des Elektrons, *Ann. Phys.*, *10*, 105-179 (1903).
- 1904a Die Grundhypothesen der Elektronentheorie, *Phys. Z.*, *5*, 576-579 (1904).
- 1904b Zur Theorie der Strahlung und des Strahlungsdruckes, *Ann. Phys.*, *14*, 236-287 (1904).
- 1904c *Theorie der Elektrizität: Einführung in die Maxwellsche Theorie der Elektrizität* (Leipzig: Teubner, 1904; 2nd ed., 1907). Revision of Föppl (1894).
- 1905 *Theorie der Elektrizität: Elektromagnetische Theorie der Strahlung* (Leipzig: Teubner, 1905; 2nd ed., 1908; 3rd ed., 1914); 1904c and this book are a two-volume set.
- 1909a Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Rend. Circ. Mat. Palermo*, *28*, 1-28 (1909).
- 1909b Zur elektromagnetischen Mechanik, *Phys. Z.*, *10*, 737-741 (1909).
- 1910 Die Bewegungsgleichungen eines Massenteilchens in der Relativtheorie, *Phys. Z.*, *11*, 527-530 (1910).
- 1912a Zur Theorie der Gravitation, *Phys. Z.*, *13*, 1-14 (1912).
- 1912b Das Elementargesetz der Gravitation, *Phys. Z.*, *13*, 4 5 (1912).
- 1914a Die neue Mechanik, *Scientia*, *15*, 10-29 (1914).
- 1914b Sur le probleme de la relativité, *Scientia*, *16*, 101 103 (1914).

Airy, George Biddell (1801-1892)
- 1871 On a supposed alteration in the amount of Astronomical Aberration of Light, produced by the passage of the Light through a considerable thickness of Refracting Medium, *Proc. R. Soc. London*, *20*, 35 39 (1871).

Arago, François (1786-1853)
- 1810 Mémoire sur la vitesse de la lumière, *C. R. Acad. Sci.*, *36*, 38 49 (1853). (Arago delayed publishing his results of 1810.)

Arnold, F.
- 1895 Über die unipolare Induktion an Wechselstrommaschinen mit ruhenden Wickelungen, *Elektrot. Z.*, *16*, 136-140 (1895).

Barnett, Samuel Johnson (1873-1956)
- 1912 On Electromagnetic Induction and Relative Motion, *Phys. Rev.*, *35*, 323 336 (1912).
- 1918 On Electromagnetic Induction and Relative Motion. II., *Phys. Rev.*, *12*, 95-114 (1918).

Becker, August
- 1905 Messungen an Kathodenstrahlen, *Ann. Phys.*, *17*, 381-470 (1905).

Becker, Richard (1887-1955)
- 1932 Unipolar-Induktion als Folge des relativistischen Zeitbegriffs, *Naturwissenschaften*, *51*, 917-919 (1932).

Bergson, Henri (1859-1941)
- 1922 *Durée et Simultanéité: A Propos de théorie d'Einstein* (1st ed., Paris: Librarie Felix Alcan, 1922; 2nd ed., 1923; 3rd ed., 1925; 4th ed., 1929), translation of 4th ed. by Leon Jacobson with an introduction by H. Dingle (New York: Bobbs-Merrill, 1965).

---

* عن كتاب :

Miller, Arthur I.
- 1981 *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1981), pp. 417-440.

Bestelmeyer, Adolf Christoph Wilhelm (1875 1954?)

1907 Spezifische Ladung und Geschwindigkeit der durch Röntgenstrahlen erzeugten Kathodenstrahlen, *Ann. Phys.*, *22*, 429–447 (1907).

1909 Bemerkung zu der Abhandlung Herrn A. H. Bucherer's 'Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips', *Ann. Phys.*, *30*, 166–174 (1909).

Boltzmann, Ludwig (1844–1906)

1891 *Vorlesungen über Maxwell's Theorie der Elektricität und des Lichtes* (2 vols.; Leipzig: Barth, vol. I, 1891; vol. II, 1893).

1897 *Vorlesungen über die Prinzipe der Mechanik* (Leipzig: Barth, 1897); see *Ludwig Boltzmann: Theoretical Physics and Philosophical Problems* (B. McGuiness, ed.) (Boston: Reidel, 1974), translated by R. Foulkes, where pp. 223 254 is a translation of the Preface of Boltzmann's *Vorlesungen*.

Born, Max (1882–1970)

1909a Die träge Masse und das Relativitätsprinzip, *Ann. Phys.*, *28*, 571-584 (1909).

1909b Die Theorie des starren Elektrons in der Kinematik des Relativitätsprinzips, *Ann. Phys.*, *30*, 1–56 (1909).

1910a Eine Ableitung der Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern vom Standpunkte der Elektronentheorie, *Math. Ann.*, *68*, 526 551 (1909–1910).

1910b Über die Definition des starren Körpers in der Kinematik des Relativitätsprinzips, *Phys. Z.*, *11*, 233 234 (1910).

1910c Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Verh. D. Phys. Ges.*, *8*, 457 467 (1910).

1910d Zur Kinematik des starren Körpers im System des Relativitätsprinzips, *Göttinger Nachr.*, 161–179 (1910).

1911 Elastizitätstheorie und Relativitätsprinzip, *Phys. Z.*, *12*, 569 575 (1911).

1920 *Einstein's Theory of Relativity* (New York: Dutton, n.d.), translated from the third German edition of 1922 by H. L. Brose.

1923 Max Abraham, *Phys. Z.*, *24*, 49–53 (1923). With M. von Laue.

1969 *Physics in my Generation* (New York: Springer-Verlag, 1969).

Brace, Dewitt Bristol (1859–1905)

1904 On Double Refraction in Matter moving through the Aether, *Philos. Mag.*, *7*, 317–329 (1904).

1905a The Negative Results of Second and Third Order Tests of the 'Aether Drift,' and Possible First Order Methods, *Philos. Mag.*, *10*, 71–80 (1905).

1905b The Aether 'Drift' and Rotary Polarization, *Philos. Mag.*, *10*, 383–396 (1905).

1905c A Repetition of Fizeau's Experiment on the Change Produced by the Earth's Motion on the Rotation of the Refracted Ray, *Philos. Mag.*, *10*, 591–599 (1905).

Bradley, James (1692–1762)

1728 A new Apparent Motion discovered in the Fixed Stars; its Cause assigned; the Velocity and Equable Motion of Light deduced, *Proc. Roy. Soc. London*, *35*, 308 321 (1728).

Bucherer, Alfred Heinrich (1863–1927)

1904 *Mathematische Einführung in die Elektronentheorie* (Leipzig: Teubner, 1904).

1905 Das deformierte Elektron und die Theorie des Elektromagnetismus, *Phys. Z.*, *6*, 833–834 (1905).

1907a On a New Principle of Relativity in Electromagnetism, *Philos. Mag.*, *13*, 413–421 (1907).

1907b The Action of Uniform Electric and Magnetic Fields on Moving Electrons, *Philos. Mag.*, *13*, 721 (1907).

1908a Messungen an Becquerelstrahlen. Die experimentelle Bestätigung der Lorentz-Einsteinschen Theorie, *Phys. Z.*, *9*, 755-762 (1908).

1908b On the Principle of Relativity and on the Electromagnetic Mass of the Electron. A Reply to Mr. Cunningham, *Philos. Mag.*, *15*, 316–318 (1908).

1909 Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips, *Ann. Phys.*, *28*, 513-536 (1909).

Budde, Emil Arnold (1842–1921)

1880 Das Clausius'sche Gesetz und die Bewegung der Erde im Raume, *Ann. Phys.*, *10*,

553–560 (1880); II, *Ibid.*, *12*, 644 647 (1881).
Classen, Johannes Wilhelm (1864–1928)
1908 Eine Neubestimmung von ε/μ für Kathodenstrahlen, *Phys. Z.*, *9*, 762–765 (1908).
Cohn, Emil (1854-1944)
1900 Über die Gleichungen der Electrodynamik für bewegte Körper, in *Recueil de travaux offerts par les auteurs à H. A. Lorentz* (The Hague: Nijhoff, 1900), pp. 516–523.
1902 Über die Gleichungen des elektromagnetischen Feldes für bewegte Körper, *Ann. Phys.*, *7*, 29–56 (1902).
1904a Zur Elektrodynamik bewegter Systeme, *Berl. Ber.*, *40*, 1294–1303 (1904).
1904b Zur Elektrodynamik bewegter Systeme. II, *Berl. Ber.*, *40*, 1404 1416 (1904).
1913 *Physikalisches über Raum und Zeit* (2 vols.; Leipzig: Teubner, 1913).
Comstock, Daniel Frost (1885 ?)
1910 A Neglected Type of Relativity, *Phys. Rev.*, *30*, 267 (1910).
Des Coudres, Theodor (1862–1926)
1889 Über das Verhalten des Lichtäthers bei den Bewegungen der Erde, *Ann. Phys.*, *38*, 71 79 (1889).
1900 Zur Theorie des Kraftfeldes electrischer Ladungen, die sich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen, in *Receuil de travaux offerts par les auteurs à H. A. Lorentz* (The Hague: Nijhoff, 1900), pp. 652–664.
Cramp, W. and E. H. Norgrove
1936 Some Investigations on the Axial Spin of a Magnet and on the Laws of Electromagnetic Induction, *J. Inst. Elec. Eng.*, *78*, 481–491 (1936); the correspondence in *Ibid.*, *79*, 344 348 (1936).
Crocker, F. B. and C. H. Parmly
1894 Unipolar Dynamos for Electric Light and Power, *Amer. Inst. Elec. Eng.*. *11*, 406–429 (1894).
Drude, Paul (1863-1906)
1900 *The Theory of Optics* (New York: Dover, 1919), translated from the first German edition of 1900 by C. R. Mann and R. A. Millikan.
Ehrenfest, Paul (1880–1933)
[Ehrenfest's papers are reprinted in *P. Ehrenfest Collected Scientific Papers* (M. J. Klein, ed.) (Amsterdam: North-Holland, 1959).]
1906 Zur Stabilitätsfrage bei den Bucherer-Langevin-Elektronen, *Phys. Z.*, *7*, 302 303 (1906). Reprinted in *Papers*, pp. 117 118.
1907 Die Translation deformierbarer Elektronen und der Flächensatz, *Ann. Phys.*, *23*, 204 205 (1907). Reprinted in *Papers*, pp. 144-145.
1909 Gleichförmige Rotation starrer Körper und Relativitätstheorie, *Phys. Z.*, *10*, 918 (1909). Reprinted in *Papers*, p. 154.
1910 Zu Herrn v. Ignatowskys Behandlung der Bornschen Starrheitsdefinition, *Phys. Z.*, *11*, 1127–1129 (1910). Reprinted in *Papers*, pp. 156–158.
1911 Zu Herrn v. Ignatowskys Behandlung der Bornschen Starrheitsdefinition, II, *Phys. Z.*, *12*, 412–413 (1911). Reprinted in *Papers*, pp. 159–160.
1912 Zur Frage nach der Entbehrlichkeit des Lichtäthers, *Phys. Z.*, *13*, 317-319 (1912). Reprinted in *Papers*, pp. 303–305.
Eichenwald, Aleksandr Aleksandrovich (1864-1944)
1903 Über die magnetischen Felde, *Ann. Phys.*, *11*, 1–30 and 421–441 (1903).
Einstein, Albert (1879–1955)
1901 Folgerungen aus den Kapillaritätserscheinungen, *Ann. Phys.*, *4*, 513 523 (1901).
1902a Thermodynamische Theorie der Potentialdifferenz zwischen Metallen und vollständig dissoziierten Lösungen ihrer Salze, und eine elektrische Methode zur Erforschung der Molekularkräfte, *Ann. Phys.*, *8*, 798–814 (1902).
1902b Kinetische Theorie des Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, *Ann. Phys.*, *9*, 417–433 (1902).
1903 Theorie der Grundlagen der Thermodynamik, *Ann. Phys.*, *11*, 170 187 (1903).

1904 Allgemeine molekulare Theorie der Wärme, *Ann. Phys.*, *14*, 354–362 (1904).

1905a Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen, Inaugural-Dissertation, Zürich Universität.

1905b Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, *Ann. Phys.*, *17*, 132 148 (1905), translated by A. B. Arons and M. B. Peppard, *Am. J. Phys.*, *33*, 367 374 (1965).

1905c Die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, *Ann. Phys.*, *17*, 549 560 (1905). Reprinted in *A. Einstein, Investigations on the Theory of the Brownian Movement* (New York: Dover, 1956), translated by A. D. Cowper, with notes by R. Furth.

1905d Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Ann. Phys.*, *17*, 891–921 (1905). Reprinted in *H. A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski, Das Relativitätsprinzip, eine Sammlung von Abhandlungen* (Leipzig: Teubner, 1st ed., 1913; 2nd and 3rd enlarged eds., 1919, 1923), translated from the edition of 1923 by W. Perrett and G. B. Jeffery as *The Principle of Relativity: A Collection of Original Memoirs on the Special and General Theories of Relativity by H. A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski and H. Weyl* (London: Metheuen, 1923); the Metheuen version was reprinted (New York: Dover, n.d.). Hereafter the Dover reprint volume is designated as *PRC*. Einstein's (1905d) is on pp. 37–65 of *PRC*. A facsimile of Einstein (1905d) is in *Selected Papers on Relativity Theory During 1905–1911: Einstein, Ehrenfest, Planck, von Laue, Langevin* (A. I. Miller, ed.) (New York: Arno Press, 1981). See the Appendix on pp. 391–415 for the version referred to in this book.

1905e Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, *Ann. Phys.*, *18*, 639–641 (1905). Reprinted in *PRC*, pp. 69 71, where the volume number is stated incorrectly and the title misspelled.

1906a Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen, *Ann. Phys.*, *19*, 289–306 (1906). Reprinted in the reprint volume in 1905c, pp. 19–35.

1906b Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption, *Ann. Phys.*, *20*, 199–206 (1906).

1906c Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und die Trägheit der Energie, *Ann. Phys.*, *20*, 627–633 (1906).

1906d Eine Methode zur Bestimmung des Verhältnisses der transversalen und longitudinalen Masse des Elektrons, *Ann. Phys.*, *21*, 583–586 (1906).

1907a Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme, *Ann. Phys.*, *22*, 180–190 (1907).

1907b Möglichkeit einer neuen Prüfung des Relativitätsprinzips, *Ann. Phys.*, *23*, 197–198 (1907).

1907c Bemerkung zur Notiz des Herrn P. Ehrenfest: Translation deformierbarer Elektronen und der Flächensatz, *Ann. Phys.*, *23*, 206–208 (1907).

1907d Die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie, *Ann. Phys.*, *23*, 371 384 (1907).

1907e Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen, *Jahrb. Radioakt.*, *4*, 411–462 (1907); *5*, 98–99 (Berichtigungen).

1908a Elektromagnetische Grundgleichungen für bewegte Körper, *Ann. Phys.*, *26*, 532–540 (1908). With J. Laub.

1908b Die im elektromagnetischen Felde auf ruhende Körper ausgeübten ponderomotorischen Kräfte, *Ann. Phys.*, *26*, 541 550 (1908). With J. Laub.

1909a Zum gegenwärtigen Stande des Strahlungsproblems, *Phys. Z.*, *10*, 185 193 (1909).

1909b Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung, *Phys. Z.*, *10*, 817 825 (1909).

1910 Principe de relativité et ses conséquences dans la physique moderne, *Arch. Sci. Phys. et Nat.*, *29*, 5–28 and 125–244 (1910).

1911a Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes, *Ann. Phys.*, *35*, 898–908 (1911). Reprinted in *PRC*. pp. 99–108.

1911b Zum Ehrenfestschen Paradoxon, *Phys. Z.*, *12*, 509 510 (1911).

1911c Relativitätstheorie, *Nat. Ges. Zürich, Viers.*, *56*, 1-14 (1911).

1912a Lichtgeschwindigkeit und Statik des Gravitationsfeldes, *Ann. Phys.*, *38*, 355-369 (1912).

1912b Theorie des statischen Gravitationsfeldes, *Ann. Phys.*, *38*, 443-458 (1912).

1913 Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und eine Theorie der Gravitation, I. Physikalischer Teil von A. Einstein. II. Mathematischer Teil von M. Grossmann (Leipzig: Teubner, 1913) and *Z. Math. und Phys.*, *62*, 225-261 (1913).

1915a Zur allgemeinen Relativitätstheorie, *Verh. D. Phys. Ges.*, 778-786 and 799-801 (1915).

1915b Das Relativitätsprinzip, in *Kultur der Gegenwart*: *Physik* (E. Warburg, ed.) (Leipzig: Teubner, 1915), pp. 703-713.

1916 Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, *Ann. Phys.*, *49*, 769-822 (1916). Reprinted in part in *PRC*, pp. 111-173.

1917a *Relativity, The Special and the General Theory* (Braunschweig: Vieweg, 1917; New York: Holt, 1920), translated from the fifth German Edition by R. W. Lawson.

1917b Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie, *Berl. Ber.*, 142-152 (1917). Reprinted in *PRC*, pp. 177-188.

1918a Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie, *Naturwissenschaften*, 697-702 (1918).

1918b Motiv des Forschens. Lecture delivered in honour of Max Planck's sixtieth birthday in 1918, and reprinted with the incorrect title "Principles of Research" in A. Einstein, *Essays in Science* (New York: Philosophical Library, 1934), translated by A. Harris, pp. 1-5. Hereafter *Essays in Science* is designated as *ES*.

1918c Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie, *Ann. Phys.*, *55*, 241-244 (1918).

1919a What is the Theory of Relativity, written for the London Times, 28 November 1919. Versions appear in A. Einstein, *Ideas and Opinions* (New York: Bonanza Books, n.d.), pp. 227-232; A. Einstein, *Out of My Later Years* (Totowa, New Jersey: Littlefield Adams and Co., 1967), pp. 54-57. Hereafter *Ideas and Opinions* is designated as *IO*.

1919b Spielen Gravitationsfelder im Aufbau der materiellen Elementarteilchen eine wesentliche Rolle?, *Berl. Ber.*, 349-356 (1919). Reprinted in *PRC*, pp. 191-198.

1920 Relativity and the Ether. Lecture presented on 27 October 1920 at Leiden University, and reprinted in *ES*, pp. 98-111.

1921a *The Meaning of Relativity*: *Four Lectures Delivered at Princeton University*, May 1921 (5th ed.; Princeton: Princeton University Press, 1970), translated by E. P. Adams.

1921b Geometry and Experience. Lecture presented on 27 January 1921 to the Prussian Academy of Sciences, and reprinted in *IO*, pp. 232-246.

1922 Einstein and the Philosophies of Kant and Mach, *Nature*, 112-253 (1923).

1923 Fundamental Ideas and Problems of the Theory of Relativity. Lecture delivered on 11 July 1923 to the Nordic Assembly of Naturalists at Gothenburg, in acknowledgement of the Nobel Prize. Reprinted in *Nobel Lectures, Physics*: *1901-1921* (New York: Elsevier, 1967), pp. 479-490.

1934 Notes on the Origin of the General Theory of Relativity. Reprinted in *ES*, pp. 78-84.

1936 Physics and Reality, *Journal of the Franklin Institute*, *221*, 313-347 (1936). Reprinted in *IO*, pp. 290-323.

1944 Remarks on Bertrand Russell's Theory of Knowledge, in *The Philosophy of Bertrand Russell* (P. A. Schilpp, ed.) (Evanston: The Library of Living Philosophers, 1944), pp. 277-291. Reprinted in *IO*, pp. 18-24.

1946 Autobiographical Notes, in *Albert Einstein*: *Philosopher-Scientist* (P. A. Schilpp, ed.) (Evanston: The Library of Living Philosophers, 1949), pp. 2-94.

1949 Paul Langevin, in Memoriam. Reprinted in *IO*, pp. 210-211.

1949 Reply to Criticisms, in *Albert Einstein*: *Philosopher-Scientist* (P. A. Schilpp, ed.) (Evanston: The Library of Living Philosophers, 1949), pp. 665-688.

1956 *Albert Einstein*: *Lettres à Maurice Solovine* (Paris: Gauthier-Villars, 1956).

1957 H. A. Lorentz, His Creative Genius and His Personality, in *H. A. Lorentz, Impressions of His Life and Work* (G. L. de Haas-Lorentz, ed.) (Amsterdam: North-Holland, 1957). Reprinted in *IO*, pp. 73-76.

1972 *Albert Einstein – Michele Besso: Correspondance 1903–1955* (Paris: Hermann, 1972), translated into French by P. Speziali who also supplied notes and an introduction.

Epstein, Paul Sophus (1883-1966)

1911 Über relativische Statik, *Ann. Phys.*, *36*, 779-798 (1911).

Faraday, Michael (1791-1867)

1932 *Faraday's Diary* (6 vols.; London: G. Bell, 1932).

1965 *Experimental Researches in Electricity* (3 vols.; New York: Dover, 1965).

FitzGerald, George Francis (1851-1901)

1882 On Electromagnetic Effects due to the Motion of the Earth, *Trans. R. Dublin Soc.*, *1*, 319 324 (1882).

Fizeau, Hippolyte (1819 1896)

1851 Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur, *C. R. Acad. Sci.*, *33*, 349 355 (1851).

1860 Sur un méthode propre à rechercher si l'azimut de polarisation du rayon réfracte est influence par le mouvement du corps réfringent, *C. R. Acad. Sci.*, *49*, 717 723 (1859); also in *Ann. Chim. Phys.*, *58*, 129-163 (1860).

Föppl, August (1854-1924)

1891 Über magnetische Ströme, *Elektrot. Z.*, *12*, 203 205 (1891).

1894 *Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektricität* (Leipzig: Teubner, 1894).

Frank, Philipp (1884 1966) and H. Rothe

1911 Über die Transformation der Raum-Zeitkoordinaten von ruhenden auf bewegte Systeme. *Ann. Phys.*, *34*, 825 855 (1911).

1912 Zur Herleitung der Lorentztransformation, *Phys. Z.*, *13*, 750-753 (1912).

Fresnel, Augustin (1788 1827)

1818 Lettre d'Augustin Fresnel à François Arago, sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique, *Ann. Chim. Phys.* IX, 57 (1818); translated in Schaffner (1972), pp. 125-135. Reprinted in A. Fresnel, *Oeuvres complètes* (3 vols.; Paris: Imprimerie Impériale; vol. I, 1866; vol. II, 1868; vol., III, 1870), II, pp. 627-636.

Gans, Richard (1880 1954)

1905 Zur Elektrodynamik in bewegten Körpern, *Ann. Phys.*, *16*, 516 534 (1905).

Goldstein, Eugen (1850-1930)

1876 Vorläufige Mittheilungen über elektrische Entladungen in verdünnten Gasen, *Berl. Monatsber.*, 279-245 (1876)

Grotrian, Otto (1847 1921)

1901 Elektrometrische Untersuchungen über unipolare Induction, *Ann. Phys.*, *6*, 794 817 (1901).

Guye, Charles-Eugène (1866-1942) and Charles Lavanchy

1916 Vérification expérimentale de la fomule de Lorentz-Einstein par les rayons cathodiques de grande vitesse, *Arch. Sci. Phys. Nat.*, *41*, 286, 353 and 441 (1916).

Hasenöhrl, Friedrich (1874 1915)

1904 Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern, *Ann. Phys.*, *15*, 344 370 (1904).

1905 Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern. Berichtigung, *Ann. Phys.*, *16*, 589-592 (1905).

Heaviside, Oliver (1850-1925)

1889 On the electromagnetic effects due to the motion of electrifications through a dielectric, *Philos. Mag.*, *27*, 324 339 (1889).

1894 *Electrical Papers* (2 vols.; London: MacMillan, 1894).

1925 *Electromagnetic Theory* (3 vols.; London: MacMillan, vol. I: 1893, 1922, 1925; vol. II: 1899, 1922, 1925; vol. III: 1912, 1922, 1925).

Heil, W.

1910 Diskussion der Versuche über die träge Masse bewegter Elektronen, *Ann. Phys.*, *31*, 519 546 (1910); Zur 'Diskussion der Versuche über die träge Masse bewegter Elektronen', *Ibid.*, *33*, 403-413 (1910).

von Helmholtz, Hermann (1821 1894)

1874 Über die Theorie der Elektrodynamik, *Borchardt's J. Math.*, *78*, 273–324 (1874).

1875 Versuche über die im ungeschlossenen Kreise durch Bewegung inducirten elektromotorischen Kräfte, *Monatsberichte Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 400–418 (1875).

1894a The Origin and Correct Interpretation of our Sense Impressions, *Z. Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*, VII, 81 96 (1894), translated in *Selected Writings of Hermann von Helmholtz* (R. Kahl, ed.) (Middletown, CT: Wesleyan University Press, 1971), pp. 501 572.

1894b Folgerungen aus Maxwell's Theorie über die Bewegungen des reinen Aethers, *Ann. Phys.*, *53*, 135–143 (1894).

1897 *Vorlesungen über die Elektromagnetische Theorie des Lichts* (Leipzig: Leopold Voss, 1897).

Herglotz, Gustav (1881–1953)

1903 Zur Elektronentheorie, *Göttinger Nachr.*, 357–382 (1903).

1910 Über den vom Standpunkt des Relativitätsprinzips aus als 'starr' zu bezeichnenden Körper, *Ann. Phys.*, *31*, 393 415 (1910).

1911 Über die Mechanik des deformierbaren Körpers vom Standpunkte der Relativitätstheorie, *Ann. Phys.*, *36*, 493–533 (1911).

Hertz, Heinrich Rudolf (1857 1894)

1880 On Induction in Rotating Spheres, Inaugural-Dissertation in Berlin, 15 March 1880. Reprinted in Hertz (1895), pp. 35 126.

1884 On the Relations between Maxwell's Fundamental Electromagnetic Equations and the Fundamental Equations of the Opposing Electromagnetics, *Ann. Phys.*, *23*, 84 103 (1884). Reprinted in Hertz (1895), pp. 273·290.

1890a On the Fundamental Equations of Electromagnetics for Bodies at Rest, *Ann. Phys.*, *40*, 577 (1890). Reprinted in Hertz (1892), pp. 195 240.

1890b On the Fundamental Equations of Electromagnetics for Bodies in Motion, *Ann. Phys.*, *41*, 369 (1890). Reprinted in Hertz (1892), pp. 241–268.

Hertz's scientific and philosophic writings are in a three volume collection that was edited by P. Lenard. For a biographical sketch of Hertz see McCorrmach (1972). The three volumes are:

1892 *Electric Waves* (Leipzig: Teubner, 1892; London: MacMillan, 1893; New York: Dover, 1962), translated by D. E. Jones.

1894 *The Principles of Mechanics* (Leipzig: Teubner, 1894; London: MacMillan, 1893; New York: Dover, 1956), translated by D. E. Jones and J. T. Walley, with a Preface by Hermann von Helmholtz. The Dover edition contains an Introduction by R. S. Cohen.

1895 *Miscellaneous Papers* (Leipzig: Teubner, 1895; London: MacMillan, 1896), translated by D. E. Jones and G. A. Schott.

Hicks, William M. (1850–1934)

1902 On the Michelson-Morley Experiment relating to the Drift of the Ether, *Philos. Mag.*, *3*, 9–42 (1902).

Hilbert, David (1862 1943)

1909–1910 Hermann Minkowski, *Math. Ann.*, *68*, 445–471 (1909 1910).

Hittorf, Johann Wilhelm (1824–1914)

1869 Über die Elektricitätsleitung der Gase, *Ann. Phys.*, *136*, 1–31 (1869).

Hoek, Martinus (1834–1873)

1868 Détermination de la vitesse avec laquelle est entrainée une onde traversant un milieu en mouvement, *Arch. Néerl.*, *3*, 180–185 (1868).

Hupka, Erich (1884–1919)

1910 Beitrag zur Kenntnis der trägen Masse bewegter Elektronen, *Ann. Phys.*, *31*, 169–204 (1910).

von Ignatowski, Waldemar (1875–?)

1910a Der starre Körper und das Relativitätsprinzip, *Ann. Phys.*, *33*, 607–630 (1910).

1910b Einige allgemeine Bemerkungen zum Relativitätsprinzip, *Phys. Z.*, *11*, 972–976 (1910).

1911a Zur Elastizitätstheorie vom Standpunkte des Relativitätsprinzips, *Phys. Z.*, *12*, 164–169 (1911).

1911b Über Überlichtgeschwindigkeiten in der Relativitätstheorie, *Phys. Z.*, *12*, 776–778 (1911).

Ives, Herbert Eugene (1882 1953)

1937 Light Signals on Moving Bodies as Measured by Transported Rods and Clocks, *J. Opt. Soc. Am.*, *27*, 177–180 (1937). With G. R. Stilwell.

1938 An Experimental Study of the Rate of a Moving Atomic Clock, *J. Opt. Soc. Am.*, *28*, 215 226 (1938).

1952 Derivation of the Mass-Energy Relation, *J. Opt. Soc. Am.*, *42*, 520–543 (1952).

Jochmann, Emil Carl Gustav Georg (1833–1871)

1864 Über die durch einen Magnet in einem rotirenden Stromleiter inducirten elektrischen Ströme, *J. R. Angew. Math.*, *63*, 158–178 (1864), translated in *Philos. Mag.*, *27*, 506–528 (1864).

Jones, R. Clark

1939 On the Relativistic Doppler Effect, *Phys. Rev.*, *29*, 337 339 (1939).

Kaufmann, Walter (1871–1947)

1897a Die magnetische Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen und ihre Abhängigkeit vom Entladungspotential, *Ann. Phys.*, *61*, 544–552 (1897).

1897b Über die Deflexion der Kathodenstrahlen, *Ann. Phys.*, *62*, 588–598 (1897).

1897c Nachtrag zu der Abhandlung 'Die magnetische Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen etc.,' *Ann. Phys.*, *62*, 596–598 (1897).

1898 Die magnetische Ablenkbarkeit electrostatisch beeinflußter Kathodenstrahlen, *Ann. Phys.*, *65*, 431–439 (1898).

1901a Die Entwicklung des Elektronenbegriffs, *Phys. Z.*, *3*, 9–15 (1901), translated in *Electrician*, *48*, 94–97 (1901).

1901b Methode zur exakten Bestimmung von Ladung und Geschwindigkeit der Becquerelstrahlen, *Phys. Z.*, *2*, 602 603 (1901).

1901c Die magnetische und electrische Ablenkbarkeit der Becquerelstrahlen und die scheinbare Masse der Elektronen, *Göttinger Nachr.*, 143–155 (1901).

1902a Über die elektromagnetische Masse des Elektrons, *Göttinger Nachr.*, 291–303 (1902).

1902b Die elektromagnetische Masse des Elektrons, *Phys. Z.*, *4*, 54–57 (1902).

1903 Über die 'Elektromagnetische Masse' der Elektronen, *Göttinger Nachr.*, 90–103, 148 – Berichtigung (1903).

1905 Über die Konstitution des Elektrons, *Berl. Ber.*, *45*, 949–956 (1905).

1906 Über die Konstitution des Elektrons, *Ann. Phys.*, *19*, 487–553 (1906); Nachtrag zu der Abhandlung: 'Über die Konstitution des Elektrons', *Ann. Phys.*, *20*, 639–640 (1906).

1907 Bemerkungen zu Herrn Plancks: 'Nachtrag zu der Besprechung der Kaufmannschen Ablenkungsmessungen', *Verh. D. Phys. Ges.*, *9*, 667 673 (1907).

1908 Erwiderung an Herrn Stark, *Verh. D. Phys. Ges.*, *10*, 91–95 (1908).

Kennard, Earle Hesse (1885–1968)

1912 Unipolar Induction, *Philos. Mag.*, *23*, 937 941 (1912).

1913 The Effect of Dielectrics on Unipolar Induction, *Phys. Rev.*, *1*, 355–359 (1913).

1917 On Unipolar Induction: Another Experiment and its Significance as Evidence for the Existence of the Aether, *Philos. Mag.* *33*, 179 190 (1917).

Kennedy, Roy J. and Edward M. Thorndike

1932 Experimental Establishment of the Relativity of Time, *Phys. Rev.*, *42*, 400 418 (1932).

Kirchhoff, Gustav (1824–1887)

1876 *Vorlesungen über mathematische Physik*: *Mechanik* (Leipzig: Teubner, 1876).

Langevin, Paul (1872 1946)

1905 La physique des électrons. Lecture delivered on 22 September 1904 at the International

Congress of Arts and Science at St. Louis, Missouri, and published in *Rev. Générale Scis. Pures Appl.*, *16*, 257 276 (1905).
1911 L'évolution de l'espace et du temps. Lecture delivered on 10 April 1911 at the Philosophy Congress at Bologna, and published in *Scientia*, *10*, 31 54 (1911).
1912 *La Théorie du rayonnement et les quanta: Rapports et discussions de la réunion tenue à Bruxelles, du 30 octobre au 3 novembre 1911* (Paris: Gauthier-Villars, 1912) (P. Langevin and M. de Broglie, eds.).

Larmor, Joseph (1857–1942)
1884 Electromagnetic Induction in Conducting Sheets and Solid Bodies, *Philos. Mag.*, *17*, 1 23 (1884). Reprinted in J. Larmor, *Mathematical and Physical Papers* (2 vols.; Cambridge: Cambridge University Press, 1929), vol. I, pp. 8–28.
1895 A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium – Part II, *Philos. Trans. R. Soc. London*, *186*, 695–742 (1895). Reprinted in *Mathematical and Physical Papers*, vol. I, pp. 543–598.
1897 A Dynamical theory of the Electric and Luminiferous Medium – Part III: Relations with Material Media, *Philos. Trans. R. Soc. London*, *190*, 205–300 (1897). Reprinted in *Mathematical and Physical Papers*, vol. II, pp. 11–132.
1900 *Aether and Matter* (Cambridge: Cambridge University Press, 1900).
1904 On the Ascertained Absence of Effects of Motion through the Aether, in Relation to the Constitution of Matter, and the Fitzgerald-Lorentz Hypothesis, *Philos. Mag.*, *7*, 621 625. Reprinted in *Mathematical and Physical Papers*, vol. II, pp. 274–280.

Laub, Jakob (1879 1962)
1907 Zur Optik der bewegten Körper, *Ann. Phys.*, *23*, 738 744 (1907).
1908 Zur Optik der bewegten Körper. II, *Ann. Phys.*, *25*, 175–184 (1908).
1910 Über die experimentellen Grundlagen des Relativitätsprinzips, *Jahrb. Radioakt.*, *7*, 405-463 (1910).

von Laue, Max (1879–1960)
1907 Die Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip, *Ann. Phys.*, *23*, 989 990 (1907).
1909 Die Wellenstrahlung einer bewegten Punktladung nach dem Relativitätsprinzip, *Ann. Phys.*, *28*, 436–442 (1909).
1911a *Das Relativitätsprinzip* (Braunschweig: Vieweg, 1911).
1911b Zur Diskussion über den starren Körper in der Relativitätstheorie, *Phys. Z.*, *12*, 85–87 (1911).
1911c Ein Beispiel zur Dynamik der Relativitätstheorie, *Verh. D. Phys. Ges.*, *9*, 513–518 (1911).
1911d Bemerkungen zum Hebelgesetz in der Relativitätstheorie, *Phys. Z.*, *12*, 1008–1010 (1911).
1911e Zur Dynamik der Relativitätstheorie, *Ann. Phys.*, *35*, 524–542 (1911).
1912a Zwei Einwände gegen die Relativitätstheorie und ihre Widerlegung, *Phys. Z.*, *13*, 118–120 (1911).
1912b Zur Theorie des Versuches von Trouton und Noble, *Ann. Phys.*, *38*, 370–384 (1912).
1912c On the conception of the current of energy, *Proc. R. Acad. Amsterdam*, *14*, 825–831 (1912).
1913 Das Relativitätsprinzip, in *Jahrbücher der Philosophie* (Berlin: Mittler & Sohn, 1913), pp. 99 128.
1949 Inertia and Energy, in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* [see Einstein (1946)], pp. 501 533.

Lebedew, Petr N. (1866 1912)
1901 Untersuchung über die Druckkräfte des Lichtes, *Ann. Phys.*, *6*, 433–458 (1901).

Lecher, Ernst (1856–1926)
1895 Eine Studie über unipolare Induction, *Ann. Phys.*, *54*, 276 304 (1895).

Lenard, Philipp (1862–1947)
1898 Über die electrostatischen Eigenschaften der Kathodenstrahlen, *Ann. Phys.*, *64*, 279 289 (1898).

1900 Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht, *Ann. Phys.*, *2*, 359–379 (1900).

1905 On Cathode Rays. Lecture delivered on 28 May 1906 in acknowledgement of the Nobel Prize. Reprinted in *Nobel Lectures, Physics: 1901–1921* (New York: Elsevier, 1967), pp. 101–138.

1930 *Große Naturforscher: Eine Geschichte der Naturforschung in Lebensbeschreibungen* (Munich: Lehmans, 1930).

Lewis, Gilbert N. (1875–1946)

1908 A Revision of the Fundamental Laws of Matter and Energy, *Philos. Mag.*, *16*, 705 717 (1908).

1909 The Principle of Relativity, and Non-Newtonian Mechanics, *Philos. Mag.*, *18*, 510–523 (1909). With R. C. Tolman.

Lorentz, Hendrik Antoon (1853–1928)

[Most of Lorentz's published papers are in H. A. Lorentz, *Collected Papers* (9 vols.; The Hague: Nijhoff, 1935–1939).]

1886 De l'influence du mouvement de la terre sur les phénomènes lumineux, *Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam*, *2*, 297 (1886). Reprinted in *Collected Papers*, *4*, pp. 153–214.

1892a La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants, *Arch. Néerl.*, *25*, 363 (1892). Reprinted in *Collected Papers*, *2*, pp. 164–343.

1892b The relative Motion of the Earth and the Ether, *Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam*, *1*, 74 (1892). Reprinted in *Collected Papers*, *4*, pp. 219–223.

1892c On the Reflection of light by Moving bodies, *Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam*, *1*, 28 (1892). Reprinted in *Collected Papers*, *4*, pp. 215–218.

1895 Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern (Leiden: Brill, 1895). Reprinted in *Collected Papers*, *5*, pp. 1 137.

1897 Concerning the problem of the dragging along of the ether by the earth, *Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam*, *6*, 266 (1897). Reprinted in *Collected Papers*, *4*, pp. 237–244.

1898 Optical Phenomena Connected with the Charge and Mass of the Ions. I., *Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam*, *6*, 506 (1898); II., *Ibid.*, *6*, 555 (1898). Reprinted in *Collected Papers*, *3*, pp. 17–39.

1899a Théorie simplifiée des phénomènes électriques et optiques dans des corps en mouvement, *Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam*, *7*, 507 (1899). Reprinted in *Collected Papers*, *5*, pp. 139–155.

1899b La théorie de l'aberration de Stokes dans l'hypothèse d'un éther n'ayant pas partout la même densité, *Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam*, *7*, 523 (1899). Reprinted in *Collected Papers*, *4*, pp. 245–251.

1900 Considérations sur la pesanteur, *Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam*, *8*, 603 (1900). Reprinted in *Collected Papers*, *5*, pp. 198–215.

1901a De electronentheorie. Lecture delivered to the Nederl. Natuur-en Geneeskundig Congres on 2 April 1901. Reprinted in *Collected Papers*, *9*, pp. 102–111.

1901b Über die scheinbare Masse der Ionen, *Phys. Z.*, *2*, 78 (1901). Reprinted in *Collected Papers*, *3*, pp. 113–116.

1901c Boltzmann's and Wien's laws of Radiation, *Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam*, *9*, 572 (1901). Reprinted in *Collected Papers*, *6*, pp. 280–292.

1902 The Rotation of the Plane of Polarization in Moving Media, *Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam*, *10*, 793 (1902). Reprinted in *Collected Papers*, *5*, pp. 56–166.

1904a Maxwell's elektromagnetische Theorie, in *Encykl. Math. Wiss.*, *13*, 63–144 (1904).

1904b Weiterbildung der Maxwellschen Theorie. Elektronentheorie, in *Encykl. Math. Wiss.*, *14*, 145–288 (1904).

1904c Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity Less than that of Light, *Proc. R. Acad. Amsterdam*, *6*, 809 (1904). Reprinted in *Collected Papers*, *5*, pp. 172–197, and in part in *PRC*, pp. 11 34.

1904d Remarque au sujet d'induction unipolaire, *Arch. Néerl.*, *9*, 380 (1904). Reprinted in

Collected Papers, *3*, pp. 177 179.

1904e Ergebnisse und Probleme der Elektronentheorie, *Elektrotechn. Verein zu Berlin, 1904* (Berlin: Springer-Verlag, 1905). Reprinted in *Collected Papers*, *8*, pp. 79–124.

1909 *The Theory of Electrons* (Leiden: Brill, 1909; rev. ed., 1916; New York: Dover, 1952).

1910 Alte und neue Fragen der Physik *Phys. Z.*, *11*, 1234–1257 (1910). Reprinted in *Collected Papers*, *7*, pp. 205–257.

1910–1912
Lectures on Theoretical Physics, *vol.* III (London: MacMillan, 1931), translated by L. Silberstein and A. P. H. Trivelli. (Lorentz's lectures at Leiden during 1910–1912 with additional material by A. D. Fokker.)

1917 The Connection Between Momentum and the Flow of Energy, Remarks Concerning the Structure of Electrons and Atoms, *Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam*, *26*, 981 (1917). Reprinted in *Collected Papers*, *5*, pp. 314–329.

1922 *Problems of Theoretical Physics* (New York: Dover, 1967). (A course of lectures delivered by Lorentz in the beginning of 1922 at the California Institute of Technology.)

1923 Notes sur la Théorie des Electrons, in *Institut International de Physique Solvay – Atomes et Electrons: Rapports et Discussions du Conseil de Physique tenu à Bruxelles du 1er au 6 avril 1921* (Paris: Gauthier-Villars, 1923), pp. 1–35.

Mach, Ernst (1838–1916)

(1889, 1897, 1960)
Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt (Leipzig: F. A. Brockhaus, 1883, 1888, 1897), translated from the sixth German edition of 1908 with revisions through the ninth German edition by T. J. McCormmack as *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of its Development* (LaSalle, IL: Open Court, 1960).

1910 Die Leitgedanken meiner naturwissenschaftlichen Erkenntnislehre und ihre Aufnahme durch die Zeitgenossen, *Phys. Z.*, *11*, 599 606 (1910). Reprinted in Toulmin (1970), pp. 30 43.

1921 *The Principles of Physical Optics* (Leipzig: Barth, 1921; London: Metheuen, 1926), translated by J. S. Anderson and A. F. A. Young.

1943 *Popular Scientific Lectures* (LaSalle, IL: Open Court, 1943), translated by T. J. McCormmack.

1959 *The Analysis of Sensations* (New York: Dover, 1959), translated by C. M. Williams.

1976 *Knowledge and Error* (Boston: Reidel, 1976), translated by T. J. McCormmack and P. Foulkes with an Introduction by E. Hiebert.

Mascart, Eleuthère E. N. (1837-1908)

1872 Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur, *Ann. Ecole Norm.*, *1*, 157–214 (1872); *Ibid.*, *3*, 157 214 (1874).

Maxwell, James Clerk (1831–1879)

1873 *Treatise on Electricity and Magnetism* (2 vols.; Oxford: Oxford University Press, 1873; reprinted from the abridged 3rd ed.: New York: Dover, 1954).

1878 Ether, in Maxwell (1952), pp. 763 775.

1952 *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell* (2 vols.; Cambridge: Cambridge University Press, 1890; New York: Dover, 1952) (W. D. Niven, ed.)

McCrea, W. H.

1957 Reply to Professor Dingle, *Nature*, *177*, 784–785 (1957).

Michelson, Albert Abraham (1852–1931)

1881 The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether, *Amer. J. Sci.*, *22*, 120–129 (1881). Reprinted in Swenson (1972), pp. 249–258.

1886 Influence of Motion of the Medium on the Velocity of Light, *Amer. J. Sci.*, *31*, 377–386 (1886). With Edward W. Morley. Reprinted in Swenson (1972), pp. 261–270.

1887 On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether, *Amer. J. Sci.*, *34*, 333–345 (1887). With Edward W. Morley. Reprinted in Swenson (1972), pp. 273 285.

Mie, Gustave (1868–1957)
1913 Grundlagen einer Theorie der Materie, *Ann. Phys.*, *40*, 1–66 (1913).
Minkowski, Hermann (1864 1909)
1907 Das Relativitätsprinzip. Lecture delivered to the Math. Ges. Göttingen on 5 November 1907, and published in *Ann. Phys.*, *47*, 927 938 (1915).
1908a Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern, *Göttinger Nachr.*, 53–111 (1908).
1908b Raum und Zeit. Lecture delivered to the 80th *Naturforscherversammlung* at Cologne on 21 September 1908 in *Phys. Z.*, *20*, 104–111 (1909). Reprinted in *PRC*, pp. 75–91.
Morton, William Blair (1868 1949)
1896 Electro-Magnetic Theory of Moving Charges, *Philos. Mag.*, *41*, 488–494 (1896).
von Mosengeil, Kurd
1907 Theorie der stationären Strahlung in einem gleichförmig bewegten Hohlraum, *Ann. Phys.*, *22*, 867–904 (1907).
Neumann, G.
1914 Die träge Masse schnell bewegter Elektronen, *Ann. Phys.*, *45*, 529 579 (1914).
Newton, Isaac (1642–1727)
1687 *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Berkeley: University of California Press, 1934), translated by A. Motte and revised by F. Cajori.
Nichols, Ernest Fox (1869–1924) and Gordon Ferry Hull
1903 The Pressure of Radiation, *Astron. J.*, *17*, 315–351 (1903), translated as Über Strahlungsdruck, *Ann. Phys.*, *12*, 225 263 (1903).
Noether, Fritz (1884 ?)
1910 Zur Kinematik des starren Körpers in der Relativitätstheorie, *Ann. Phys.*, *31*, 919–944 (1910).
Otting, G.
1939 Der quadratische Dopplereffekt, *Phys. Z.*, *40*, 681–687 (1939).
Pauli, Wolfgang (1900 1958)
1958 *Theory of Relativity*, translated by G. Field (New York: Pergamon, 1958). This is a translation of Pauli's article Relativitätstheorie, in *Encykl. Math. Wiss.*, *19* (Leipzig: Teubner, 1921).
Pegram, George B. (1876–1958)
1917 Unipolar Induction and Electron Theory, *Phys. Rev.*, *10*, 591–600 (1917).
Perrin, Jean (1870–1942)
1895 Nouvelles propriétés des rayons cathodiques, *C. R. Acad. Sci.*, *121*, 1130–1134 (1895).
Petzoldt, Josef (1862 1929)
1914 Die Relativitätstheorie der Physik. *Z. Positivische Philos.*, *1*, 1 56 (1914).
Planck, Max Karl Ludwig (1858–1947)
1896 Gegen die neuere Energetik, *Ann. Phys.*, *57*, 72–78 (1896).
1900a Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung, *Verh. D. Phys. Ges.*, *2*, 202–204 (1900), translated in ter Haar (1967), pp. 79–81.
1900b Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum, *Verh. D. Phys. Ges.*, *2*, 237 245 (1900), translated in ter Haar (1967), pp. 82 90.
1901 Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum, *Ann. Phys.*, *4*, 553–563 (1901).
1906a Das Prinzip der Relativität und die Grundgleichungen der Mechanik, *Verh. D. Phys. Ges.*, *4*, 136–141 (1906).
1906b Die Kaufmannschen Messungen der Ablenkbarkeit der β-Strahlen in ihrer Bedeutung für die Dynamik der Elektronen, *Phys. Z.*, *7*, 753–761 (1906); published without the discussion session in *Verh. D. Phys. Ges.*, *8*, 418 432 (1906).
1906c *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung* (Barth: Leipzig, 1906); second revised edition of 1913 translated by M. Masius as *Theory of Radiation* (New York: Dover 1959).

1907a Zur Dynamik bewegter Systeme, *Berl. Ber.*, *13*, 542–570 (1907); also in *Ann. Phys.*, *26*, 1–34 (1908).
1907b Nachtrag zu der Besprechung der Kaufmannschen Ablenkungsmessungen, *Verh. D. Phys. Ges.*, *9*, 301–305 (1907).
1908 Bemerkungen zum Prinzip der Aktion und Reaktion in der allgemeinen Dynamik, *Phys. Z.*, *9*, 828–830 (1908).
1909 Die Einheit des physikalischen Weltbildes, *Phys. Z.*, *10*, 62–75 (1909). Reprinted in Toulmin (1970), pp. 3–27.
1910a Gleichförmige Rotation und Lorentz-Kontraktion, *Phys. Z.*, *11*, 294 (1910).
1910b Zur Machschen Theorie der physikalischen Erkenntnis, *Phys. Z.*, *11*, 1186–1190 (1910). Reprinted in Toulmin (1970), pp. 45–52.
1915 Das Prinzip der kleinsten Wirkung, in *Kultur der Gegenwart*: *Physik* (E. Warburg, ed.) (Leipzig: Teubner, 1915), pp. 692–702. Reprinted as The Principle of Least Action, in M. Planck, *A Survey of Physical Theory* (New York: Dover, 1960), translated by R. Jones and D. H. Williams, pp. 69 81.
1931 Maxwell's Influence in Germany, in *James Clerk Maxwell*: *A Commemoration Volume, 1831–1931* (Cambridge: Cambridge University Press, 1931).

Plücker, Julius (1801–1868)
1858 Über die Einwirkung des Magneten auf die elektrischen Entladungen in verdünnten Gasen, *Ann. Phys.*, *103*, 88–106, 151 157; *104*, 113–128, 622 630; *105*, 67–84.

Poincaré, Henri (1854–1912)
[Most of Poincaré's published papers are in *Oeuvres de Henri Poincaré* (11 vols.; Paris: Gauthier-Villars, 1934–1953).]
1887 Sur les hypothèses fondamentales de la Géométrie, *Bull. Soc. Math. France*, *15*, 203–216 (1887).
1891 Les Géométries non-euclidiennes, *Rev. Générale Sci. Pures Appl.* *2*, 769–774 (1891).
1895 A propos de la théorie de M. Larmor, *L'Eclairage électrique*, *3*, 5–13 and 289–295 (1895); Ibid., *5*, 5–14 and 385–392 (1895). Reprinted in *Oeuvres de Henri Poincaré*, *9*, pp. 396–426. Hereafter vol. 9 is referred to as *Oeuvres*.
1898 La mesure du temps, *Rev. Mét. Mor.*, *6*, 371–384 (1898); translated in V.S., pp. 26 36.
1899 Des fondements de la Géométrie: A propos d'un Livre de M. Russell, *Rev. Mét. Mor.*, *7*, 251–279 (1899). This is a book review of Bertrand Russell's *An Essay on the Foundation of Geometry* (Cambridge: Cambridge University Press, 1897; New York: Dover, 1952). Pages 265–269 of Poincaré's review constitute pages 75 79 of Chapter V, "Experiment and Geometry", of Poincaré's (1902).
1900a Sur les rapports de la Physique expérimentale et de la Physique mathématique, *Rapports presentés au Congrès international de Physique réuni à Paris en 1900* (4 vols.; Paris: Gauthier-Villars, 1900), vol. 1, pp. 1 29. Reprinted in German as Über die Beziehungen zwischen der experimentellen und der mathematischen Physik, *Phys. Z.*, *2*, 166–171, 182–186 and 196–201 (1900–1901). This lecture forms the substance of Chaps. IX and X of Poinaré's (1902), pp. 140–182.
1900b La théorie de Lorentz et le principe de réaction, in *Recueil de travaux offerts par les auteurs à H. A. Lorentz* (The Hague: Nijhoff, 1900), pp. 252–278. Reprinted in *Oeuvres*, pp. 464–488.
1900c Sur les principes de la Mécanique, *Bibliothèque du Congres International de Philosophie tenu à Paris du 1er au 5 août 1900* (Paris: Colin, 1901), pp. 457–494; an expanded version of this paper is presented on pp. 123 139 of Poincaré's (1902).
1900d Sur l'induction unipolare, *L'Eclairage électrique*, *23*, 41–53 (1900).
1901 *Electricité et Optique* (Paris: Gauthier-Villars, 1901). (Poincaré's lectures at the Sorbonne from 1888, 1890 and 1899.)
1902 *Science and Hypothesis* (New York: Dover, 1952), translator unknown. This is a translation of Poincaré's, *La Science et l'Hypothèse* (Paris: Ernest Flammarion, 1902).
1904 L'état actuel et l'avenir de la Physique mathématique. Lecture delivered on 24 September 1904 to the International Congress of Arts and Science, Saint Louis,

Missouri, and published in *Bull. Sci. Mat.*, *28*, 302 324. Reprinted on pp. 91-111 of Poincaré's (1905b).

1905a Sur la dynamique de l'électron, *C. R. Acad. Sci.*, *140*, 1504-1508 (1905). Reprinted in *Oeuvres*, pp. 489 493.

1905b *The Value of Science* (New York: Dover, 1958), translated by George Bruce Halsted. This is a translation of Poincaré's *La Valeur de la Science* (Paris: Ernest Flammarion, 1905).

1906 Sur la dynamique de l'électron, *Rend. Circ. Mat. Palermo*, *21*, 129-175 (1906). Reprinted in *Oeuvres*, pp. 494-550.

1908a *Science and Method* (New York: Dover, n.d.), translated by Francis Maitland. This is a translation of Poincaré's *Science et Méthode* (Paris: Ernest Flammarion, 1908).

1908b La dynamique de l'électron, *Rev. Générale Sci. Pures Appl.*, *19*, 386-402 (1908). Reprinted in *Oeuvres*, pp. 551 586. Excerpts from this paper have been translated in Book III, pp. 199 250 of Poincaré's (1908a).

1909 La mécanique nouvelle, the last of Poincaré's six Wolfskehl lectures given at Göttingen in 1909 and published in *Sechs Vorträge über ausgewählte Gegenstände aus der reinen Mathematik und mathematischen Physik* (Leipzig: Teubner, 1910).

1912a La dynamique de l'électron (Paris: Dumas, 1913).

1912b Les rapports de la matière et de l'éther, *J. Phys. Théor. Appl.*, *2*, 347 (1912). Reprinted in Chapter VII, pp. 89-101 of Poincaré (1913).

1912c L'éspace et le temps. Lecture delivered on 4 May, 1912 at the University of London. Reprinted in Chapter II, pp. 15-24 of Poincaré's (1913).

1913 *Mathematics and Science: Last Essays*, (New York: Dover, 1963), translated by J. W. Bolduc. This is a translation of Poincaré's, *Dernières Pensées* (Paris, Ernest Flammarion, 1913).

1924 *Le mécanique nouvelle* (Paris: Gauthier-Villars, 1924).

Precht, Julius (1871 – 1942)

1906 Strahlungsenergie von Radium, *Ann. Phys.*, *21*, 595-601 (1906).

Preston, S. Tolver (1844 – ?)

1885a On some Electromagnetic Experiments of Faraday and Plücker, *Philos. Mag.*, *19*, 131-140 (1885).

1885b On some Electromagnetic Experiments, continued, – No. II, Diverse views on Faraday, Ampère, and Weber, *Philos. Mag.*, *19*, 215-218 (1885).

1891 The Problem of the Behavior of the Magnetic Field about a Revolving Magnet. *Philos. Mag.*, *31*, 100-102 (1891).

Lord Rayleigh [J. W. Strutt] (1842-1919)

1902 Does Motion through the Aether cause Double Refraction?, *Philos. Mag.*, *4*, 678-683 (1902).

Richardson, Owen W. (1879-1959)

1916 *The Electron Theory of Matter* (Cambridge: Cambridge University Press, 1916).

Ritz, Walther (1878-1909)

1908a Recherches critiques sur l'Electrodynamique générale, *Ann. Chim. Phys.*, *13*, 145 (1908). Reprinted in W. Ritz, *Oeuvres* (Paris: Gauthier-Villars, 1911), pp. 317-426.

1908b Recherches critiques sur les théories électrodynamiques de Cl. Maxwell et de H. A. Lorentz, *Arch. Sci. Phys. et Nat.*, *26*, 209 (1908). Reprinted in *Oeuvres*, pp. 422-446.

1908c Rôle de l'éther en physique, *Scientia*, III, 260 – 274 (1908). Reprinted in *Oeuvres*, pp. 447 461.

1908d Über ein neues Gesetz der Serienspektren, *Phys. Z.*, *9*, 521 (1908). Reprinted in *Oeuvres*, pp. 141-162.

1909 Zum gegenwärtigen Stande des Strahlungsproblems, *Phys. Z.*, *10*, 323-324 (1909). Reprinted in *Oeuvres*, pp. 507 508. With A. Einstein.

Röntgen, Wilhelm Konrad (1845-1923)

1888 Über die durch Bewegung eines im homogenen elektrischen Felde befindlichen Dielektrums hervorgerufene elektrodynamische Kraft, *Ann. Phys.*, *35*, 246 283 (1888).

Runge, Carl (1856 1927)
1903 Über die elektromagnetische Masse der Elektronen, *Göttinger Nachr.*, 326-330 (1903).
Russell, Bertrand (1872-1970)
1897 *An Essay on the Foundations of Geometry* (Cambridge: Cambridge University Press, 1897; New York: Dover. 1952).
Rutherford, Ernest (1871-1937)
1899 Uranium Radiation and the Electrical Conduction produced by it, *Philos. Mag.*, *47*, 109-163 (1899).
1914 The structure of the Atom, *Philos. Mag.*, *27*, 488 (1914).
Schwarzschild. Karl (1873 1916)
1903 Zur Elektrodynamik. III. Über die Bewegung des Elektrons, *Göttinger Nachr.*, 245-278 (1903).
Searle, George Frederick Charles (1864 – ?)
1897 On the motion of an electrified ellipsoid, *Philos. Mag.*, *44*, 329-341 (1897).
von Siemens, Werner (1816-1892)
1881 Die dynamoelektrische Maschine, *Elektrot. Z.*, *2*, 89-95 (1881).
1893 *Personal Recollections* (New York: Appleton, 1893), translated by W. C. Coupland.
Silberstein, Ludwik (1872-1948)
1914 *The Theory of Relativity* (London: MacMillan, 1914).
Simon, S.
1899 Über das Verhältnis der elektrischen Ladung zur Masse der Kathodenstrahlen, *Ann. Phys.*, *69*, 589 611 (1899).
Sommerfeld, Arnold (1868 1951)
[Most of Sommerfeld's scientific papers have been reprinted in *Gesammelte Schriften* (4 vols.; Braunschweig: Vieweg, 1968).]
1904a Allgemeine Untersuchung des Feldes eines beliebig bewegten Elektrons, *Göttinger Nachr.*, 99 130 (1904). Reprinted in *Schriften*. II, pp. 39-70.
1904b Grundlagen für eine allgemeine Dynamik des Elektrons. *Göttinger Nachr.*, 363-439 (1904). Reprinted in *Schriften*, II, pp. 71-147.
1904c Simplified Deduction of the Field and the Forces of an Electron, moving in any given way, *Proc. R. Acad. Amsterdam*, *7*, 346 367 (1904).
1905 Über Lichtgeschwindigkeits- und Überlichtgeschwindigkeits-Elektronen, *Göttinger Nachr.*, 201-235 (1905). Reprinted in *Schriften*, II, pp. 148 182.
1907 Ein Einwand gegen die Relativtheorie der Elektrodynamik und seine Beseitigung, *Phys. Z.*, *8*, 841-842 (1907). Reprinted in *Schriften*, II, pp. 183 184.
1909 Über die Zusammensetzung der Geschwindigkeiten in der Relativtheorie, *Phys. Z.*, *10*, 826-829 (1909). Reprinted in *Schriften*, II, pp. 185 188.
1910a Zur Relativitätstheorie I: Vierdimensionale Vektoralgebra, *Ann. Phys.*, *32*, 749 776 (1910).
1910b Zur Relativitätstheorie II: Vierdimensional Vektoralgebra, *Ann. Phys.*, *33*, 649-689. Both papers of 1910 are reprinted in *Schriften*, II, pp. 189-257.
1911 Das Plancksche Wirkungsquantum and seine allgemeine Bedeutung für die Molekularphysik, *Phys. Z.*, *12*, 1057 1069 (1911).
1915 Die Feinstruktur der wasserstoff- und wasserstoffähnlichen Linien, *Münchener Berichte*, 459 500 (1915).
1916 Zur Quantentheorie der Spektrallinien, *Ann. Phys.*, *51*, 1 94, 125-167 (1916).
1948 Philosophie und Physik seit 1900, *Naturwissenschaftliche Rundschau*. *1*, 97 100 (1948). Reprinted in *Schriften*, IV, pp. 640-643.
c. 1950 Autobiographische Skizze, in *Schriften*, IV, pp. 673-682 (F. Bopp, ed.).
1964 *Electrodynamics* (New York: Dover. 1964), translated by E. G. Ramberg.
Stark, Johannes (1874-1957)
1906 Über die Lichtemission der Kanalstrahlen in Wasserstoff, *Ann. Phys.*, 401 456 (1906).
1908 Bemerkung zu Herrn Kaufmanns Einwand 'Antwort auf einen Einwand von Herrn Planck', *Verh. D. Phys. Ges.*, *10*, 14 16 (1908).

Starke, Hermann (1874-1960)
1903 Über die elektrische und magnetische Ablenkung schneller Kathodenstrahlen, *Verh. D. Phys. Ges.*, *1*, 241-250 (1903).
1934 Über die Bestimmung der Massenveränderlichkeit des Elektrons an schnellen Kathodenstrahlen, *Ann. Phys.*, *21*, 67-88 (1934). With M. Nacken.
Stead, G. and H. Donaldson
1910 The Problem of Uniform Rotation Treated on the Principle of Relativity, *Philos. Mag.*, *115*, 92-95 (1910).
Stokes, George Gabriel (1819-1903)
[Many of Stokes' published papers are in G. G. Stokes, *Mathematical and Physical Papers* (5 vols.; Cambridge: Cambridge University Press, 1880-1905).]
1845 On the Aberration of Light, *Philos. Mag.*, *27*, 9 (1845). Reprinted in *Mathematical and Physical Papers*, vol. I., pp. 134-140.
1846 On Fresnel's Theory of the Aberration of Light, *Philos. Mag.*, *28*, 76 (1846). Reprinted in *Mathematical and Physical Papers*, vol. I, pp. 141-147.
Stoney, George Johnstone (1826-1911)
1894 Of the 'Electron' or Atom of Electricity, *Philos. Mag.*, *38*, 418 420 (1894).
Sutherland, William (1859-1911)
1899 Cathode, Lenard and Röntgen Rays, *Philos. Mag.*, *47*, 269-284 (1899).
Swann, William Francis Gray (1884-1962)
1920 Unipolar Induction, *Phys. Rev.*, *15*, 365-398 (1920).
Szarvassi, Arthur
1909 Die Theorie der elektromagnetischen Erscheinungen in bewegten Körpern und das Energieprinzip, *Phys. Z.*, *10*, 811-813 (1909).
Tate, J. T.
1922 Unipolar Induction, *Bull. Nat. Res. Council*, *4*, 75-95 (1922).
Thomson, Joseph John (1856-1940)
1880 On Maxwell's Theory of Light, *Philos. Mag.*, *9*, 284-291 (1880).
1881 On the electric and magnetic effects produced by motion of electrified bodies, *Philos. Mag.*, *11*, 229-249 (1881).
1889 On the Magnetic Effects produced by Motion in the Electric Field, *Philos. Mag.*, *28*, 1-14 (1889).
1893 *Recent Researches in Electricity and Magnetism: Intended as a Sequel to Professor Clerk Maxwell's Treatise on Electricity and Magnetism* (Oxford: Clarendon Press, 1893).
1897 Cathode Rays, *Philos. Mag.*, *44*, 293-316 (1897).
1898 On the Charge of Electricity produced by Röntgen rays, *Philos. Mag.*, *46*, 528-545 (1898).
1899 On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures, *Philos. Mag.*, *48*, 547-567 (1899).
1906 Carriers of negative electricity. Lecture delivered on 11 December 1906 in acknowledgement of the Nobel Prize. Reprinted in *Nobel Lectures, Physics: 1901-1921* (New York: Elsevier, 1967), pp. 141-155.
Tolman, Richard Chase (1881-1948)
1910 The Second Postulate of Relativity, *Phys. Rev.*, 291 (1910); *Ibid.*, *31*, 26 40 (1910).
1911a Note on the Derivation from the Principle of Relativity of the Fifth Fundamental Equation of the Maxwell-Lorentz Theory, *Philos. Mag.*, *21*, 296-301 (1911).
1911b Non-Newtonian Mechanics: The Direction of Force and Acceleration, *Philos. Mag.*, *22*, 458-463 (1911).
1912a Non-Newtonian Mechanics, The Mass of a Moving Body, *Philos. Mag.*, *23*, 375-380 (1912).
1912b Some Emission theories of Light, *Phys. Rev.*, *35*, 136-143 (1912).
1913 Non-Newtonian Mechanics: Some Transformation Equations, *Philos. Mag.*, *25*, 150 157 (1913).
1917 *The Theory of the Relativity of Motion* (Berkeley: University of California Press, 1917).

Trocheris, M. G.
1949 Electrodynamics in a Rotating Frame of Reference. *Philos. Mag.*, *40*, 1143–1154 (1949).
Trouton, Frederick Thomas (1863–1922) and H. R. Noble
1903 The Mechanical Forces Acting on a Charged Electric Condenser moving through Space, *Philos. Trans. R. Soc. London*, *202*, 165-181 (1903).
Uppenborn, F.
1885 Über Unipolarmaschinen, *Centralblatt für Elektrotechnik*, 7, 324–329 (1885).
Varičak, V.
1911 Zum Ehrenfestschen Paradoxon, *Phys. Z.*, *12*, 169 (1911).
Veltmann, Wilhelm (1832–1902)
1870a Fresnel's Hypothese zur Erklärung der Aberrationserscheinungen, *Astron. Nachr.*, *75*, 145–150 (1870).
1870b Über die Fortpflanzung des Lichtes in bewegten Medien, *Astron. Nachr.*, *76*, 129–144 (1870).
1873 Über die Fortpflanzung des Lichtes in bewegten Medien, *Ann. Phys.*, *150*, 497–535 (1873).
Voigt, Woldemar (1850–1919)
1887 Über das Doppler'sche Prinzip, *Göttinger Nachr.*, 14 (1887). Reprinted in *Phys. Z.*, *16*, 381 386 (1915).
Van der Waals, J. D., Jr.
1912 Energy and Mass. II, *Proc. R. Acad. Amsterdam*, *14*, 821·831 (1912).
Weber, C. L.
1895 Über unipolare Induktion, *Elektrot. Z.*, *16*, 513–514 (1895).
Weber, Wilhelm (1804–1891)
1841 Unipolare Induktion, *Ann. Phys.*, *52*, 353–386 (1841).
Wiechert, Emil (1861 1928)
1898 Hypothesen für eine Theorie der elektrischen und magnetischen Erscheinungen, *Göttinger Nachr.*, 87 106 (1898).
1900 Elektrodynamische Elementargesetze, in *Recueil de travaux offerts par les auteurs à H. A. Lorentz* (The Hague: Nijhoff, 1900), pp. 549–573. Reprinted in *Ann. Phys.*, *4*, 667–669 (1901).
1911 Relativitätsprinzip und Aether. I, *Phys. Z.*, *12*, 689 707 (1911); II, *Ibid.*, *12*, 737–758 (1911).
1915 Die Mechanik im Rahmen der allgemeinen Physik, in *Die Kultur der Gegenwart: Physik* (E. Warburg, ed.) (Leipzig: Teubner, 1915), pp. 1 78.
Wiedemann, Gustav Heinrich (1826 1899)
1885 *Die Lehre von der Elektricität* (4 vols.; Braunschweig: F. Vieweg und Sohn, 1885).
Wien, Wilhelm (1864 1928)
1898 Untersuchungen über die electrische Entladung in verdünnten Gasen, *Ann. Phys.*, *65*, 440 452 (1898).
1900 Über die Möglichkeit einer elektromagnetischen Begründung der Mechanik, in *Recueil de travaux offerts par les auteurs à H. A. Lorentz* (The Hague: Nijhoff, 1900), pp. 96–107. Reprinted in *Ann. Phys.*, *5*, 501 513 (1901).
1904a Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper. I. *Ann. Phys.*, *13*, 641–662 (1904); II., *Ibid.*, 663–668 (1904).
1904b Erwiderung auf die Kritik des Hrn. Abraham, *Ann. Phys.*, *14*, 635–637 (1904).
1909 *Über Elektronen* (Leipzig: Teubner, 1909).
1911 On the laws of Thermal Radiation. Lecture delivered on 11 December 1911 in acknowledgement of the Nobel Prize. Reprinted in *Nobel Lectures, Physics: 1901–1921* (New York: Elsevier, 1967), pp. 271 289.
Young, Thomas (1773–1829)
1804 Experiments and Calculations relative to physical optics, *Proc. Roy. Soc. London*, *94*, 1–16 (1804).

Zahn, C. T. and A. A. Spees
1938a An Improved Method for the Determination of the Specific Charge of Beta-Particles, *Phys. Rev.*, *53*, 357 364 (1938).
1938b The Specific Charge of Disintegration Electrons From Radium E, *Phys. Rev.*, *53*, 365–373 (1938).
1938c A critical analysis of the classical experiments on the variation of electron mass, *Phys. Rev.*, *53*, 511–521 (1938).
Zeeman, Pieter (1865–1943)
1897 On the Influence of Magnetism on the Nature of the Light emitted by Substance, *Philos. Mag.*, *43*, 226 239 (1897).
1914–1915
Fresnel's coefficient for light of different colours, *Proc. R. Acad. Amsterdam*, *17*, 445–451 (1914); 2nd part in *Ibid.*, *18*, 398–408 (1915).

Secondary Sources المصادرُ الثانويّة

Anderson, David L.
1966 Resource Letter ECAN-1 on the Electronic Charge and Avogadro's Number, *Am. J. Phys.*, *34*, 2–8 (1966).
Arnheim, Rudolf
1971 *Visual Thinking* (Berkeley: University of California Press, 1971).
Becker, Richard and Fritz Sauter
1964 *Electromagnetic Fields and Interactions* (2 vols.; New York: Blaisdell, 1964).
Bell, Eric Temple
1945 *The Development of Mathematics* (New York: McGraw-Hill, 1945).
Bernstein, Jeremy
1973 *Einstein* (New York: Viking Press, 1973).
Beyerchen, Alan D.
1977 *Scientists Under Hitler: Politics and the Physics Community in the Third Reich* (New Haven: Yale University Press, 1977)
Biquard, Pierre
1969 *Paul Langevin: scientifique, èducateur, citoyen* (Paris: Seghers, 1969)
Blackmore, John
1972 *Ernst Mach: His Life, Work, and Influence* (Berkeley: University of California Press, 1972).
Bork, A. M.
1966a Physics Just Before Einstein, *Science*, *152*, 597–603 (1966).
1966b The 'Fitzgerald' Contraction Hypothesis, *ISIS*, *57*, 199 207 (1966).
Bowman, Peter
1978 Is Signal Synchrony Independent of Transport Synchrony?, *Philos. Sci.*, *45*, 309–311 (1978).
Brecher, Kenneth
1977 Is the Velocity of Light Independent of its Source, *Phys. Rev. Letters*, *39*, 1051–1054 (1977).
Bridgman, Percy W.
1949 Einstein's Theories and the Operational Point of View, in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (P. A. Schilpp, ed.) (La Salle, IL: Open Court, 1949), pp. 333–354.
Brush, Stephen G.
1967 Note on the History of the Fitzgerald-Lorentz Contraction, *ISIS*, *54*, 230 232 (1967).
1976 *The Kind of Motion We Call Heat* (2 vols.; Amsterdam: North-Holland, 1976).
Builder, Geoffrey
1957 The Resolution of the Clock Paradox. *Austr. J. Phys.*, *10*, 246–262 (1957).
1958 Ether and Relativity. *Austr. J. Phys.*, *11*, 279–297 (1958).

Campbell, John T.

1973 Kaufmann, Walter, in *Dictionary of Scientific Biography* (C. C. Gillispie, ed.), VII (New York, Scribner, 1973), pp. 263 265.

Cullwick, E. G.

1959 *Electromagnetism and Relativity: With Particular Reference to Moving Media and Electromagnetic Induction* (1st ed., New York: Wiley, 1957; 2nd ed., 1959).

Darboux, Gaston

1913 Elogie de Henri Poincaré, in *Oeuvres de Henri Poincaré* (11 vols.; Paris: Gauthier-Villars, 1934-1954), vol. 2, pp. vii-lxxii.

Darwin, C. G.

1957 The Clock Paradox in Relativity, *Nature*, 976 977 (1957).

Ellis, B. and P. Bowman

1967 Conventionality in Distant Simultaneity. *Philos. Sci.*. *34*, 116 136 (1967).

Everitt, C. W. F.

1974 Maxwell, James Clerk, in *Dictionary of Scientific Biography*, (C. C. Gillispie, ed.), IX (New York: Scribner, 1974), pp. 198 230; also published as *James Clerk Maxwell* (New York: Scribner, 1975).

Flückiger, Max

1974 *Albert Einstein in Bern* (Bern: Haupt, 1974).

Forman, Paul

1975 Sommerfeld, Arnold, in *Dictionary of Scientific Biography* (C. C. Gillispie, ed.), XII (New York: Scribner, 1975), pp. 525 532. With A. Hermann.

Fox, J. G.

1965 Evidence Against Emission Theories, *Am. J. Phys.*, *33*, 1- 17 (1965).

Frank, Philipp

1947 *Einstein: Sein Leben und seine Zeit* (New York: Knopf, 1947), translated by G. Rosen, and edited and revised by S. Kusaka (New York: Knopf, 1953).

French, Anthony P.

1966 *Special Relativity* (New York: Norton and Company, 1966).

Galison, Peter

1979 Minkowski's Space-Time: From Visual Thought to the Absolute World, *Hist. Studies Phys. Scis.*, *10*, 85 121 (1979).

Giannoni, Carlo

1978 Relativistic Mechanics and Electrodynamics with One-way Velocity Assumptions, *Philos. Sci.*, *45*, 17 46 (1978).

Gillispie, Charles Coulston

1960 *The Edge of Objectivity: An Essay in the History of Scientific Ideas* (Princeton: Princeton University Press, 1960).

Goldberg, Stanley

1967 Henri Poincaré and Einstein's Theory of Relativity, *Am. J. Phys.*, *35*, 934-944 (1967).

1969 The Lorentz Theory of Electrons and Einstein's Theory of Relativity, *Am. J. Phys.*, *37*, 498-513 (1969).

1970a Poincaré's Silence and Einstein's Relativity: The Role of Theory and Experiment in Poincaré's Physics, *Brit. J. Hist. Sci.*, *5*, 73-84 (1970).

1970b The Abraham Theory of the Electron: The Symbiosis of Experiment and Theory, *Arch. Hist. Exact Scis.*, 7, 7-25 (1970).

1976 Max Planck's Philosophy of Nature and His Elaboration of the Special Theory of Relativity. *Hist. Studies Phys. Scis.*, 7, 125-160 (1976).

Grünbaum, Adolf

1973 *Philosophical Problems of Space and Time* (Dordrecht: Reidel, 1973).

Guillaume, Charles-Edouard

1924 Introduction to Poincaré's (1924).

Gunter, P. A. Y.

1969 *Bergson and the Evolution of Physics* (P. A. Y. Gunter, ed.) (Knoxville: University of

Tennessee Press, 1969).
ter Haar, D.
1967 *The Old Quantum Theory* (D. ter Haar, ed.) (New York: Pergamon Press, 1967).
De Haas-Lorentz, G. L.
1957 Reminiscences, in *H. A. Lorentz, Impressions of His Life and Work*, (G. L. de Haas-Lorentz, ed.) (Amsterdam: North-Holland, 1957), pp. 15 47, 82–120.
Hahn, Roger
1970 Arago, Dominique François Jean, in *Dictionary of Scientific Biography* (C. C. Gillispie, ed.). I (New York: Scribner, 1970), pp. 200–203.
Heilbron, John
1976 Thomson, Joseph John, in *Dictionary of Scientific Biography* (C. C. Gillispie, ed.) XII (New York: Scribner, 1976), pp. 362–372.
Heimann, Peter M.
1970 Maxwell and Modes of Consistent Representation, *Arch. Hist. Exact Scis.*, *6*, 171–213 (1970).
1971 Maxwell, Hertz and the Nature of Electricity, *ISIS*, *62*, 149 157 (1971).
Hermann, Armin
1966 Albert Einstein und Johannes Stark: Briefwechsel und Verhältnis der beiden Nobelpreisträger, *Sudhoffs Archiv für Geschichte der Medizin und der Naturwissenschaften der Pharmazie und der Mathematik*, *50*, 267 285 (1966).
1971 *The Genesis of Quantum Theory (1899 1913)* (Cambridge: MIT Press, 1971), translated by C. W. Nash.
1973 Lenard, Philipp, in *Dictionary of Scientific Biography* (C. C. Gillispie, ed.) VIII (New York: Scriber, 1973), pp. 180 183.
1975 Stark, Johannes, in *Dictionary of Scientific Biography* (C. C. Gillispie, ed.) XII (New York: Scribner, 1975), pp. 613–616.
Hiebert, Erwin N.
1973 Mach, Ernst, in *Dictionary of Scientific Biography* (C. C. Gillispie, ed.) VII (New York: Scribner, 1973), pp. 595–607.
Hirosige, Tetu
1966 Electrodynamics before the Theory of Relativity, *Jpn. Studies Hist. Sci.*, *5*, 1–49 (1966).
1969 Origins of Lorentz' Theory of Electrons and the Concept of the Electromagnetic Field. *Hist. Studies Phys. Scis.*, *1*, 151–209 (1969).
1976 The Ether Problem, the Mechanistic Worldview, and the Origins of the Theory of Relativity, *Hist. Studies Phys. Scis.*, *7*, 3 82 (1976).
Hoffmann, Banesh
1972 *Albert Einstein, Creator and Rebel* (New York: Viking, 1972). With the collaboration of Helen Dukas.
1979 *Albert Einstein, The Human Side* (Princeton: Princeton University Press, 1979). With Helen Dukas.
Holton, Gerald
1962 Resource Letter SRT-1 on Special Relativity Theory, *Am. J. Phys.*, *30*, 462–469 (1962).
1973 *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1973) – the essay's original dates of publication are given in parenthesis;
(a) On the Origins of the Special Theory of Relativity, pp. 165–183 (1962).
(b) Poincaré and Relativity, pp. 185–195 (1964).
(c) Influences on Einstein's Early Work, pp. 197–217 (1967).
(d) Mach, Einstein, and the Search for Reality, pp. 219 259 (1968).
(e) Einstein, Michelson, and the 'Crucial' Experiment, pp. 261–352 (1969).
(f) On Trying the Understand Scientific Genius, pp. 353 380 (1971).
1978 Subelectrons, presuppositions and the Millikan-Ehrenhaft dispute, in G. Holton, *The Scientific Imagination: Case Studies* (Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1978), pp. 25 83.

1979 Einstein's Scientific Program: The Formative Years. Lecture presented on 5 March 1979 at the Einstein Centennial Celebration, the Institute for Advanced Study, 4–9 March 1979. Scheduled to appear in the *Proceedings*.

Infeld, Leopold

1950 *Albert Einstein: His Work and Influence on Our World* (New York: Scribner, 1950).

Jammer, Max

1957 *Concepts of Force* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1957).

1961 *Concepts of Mass* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1961).

1966 *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (New York: McGraw-Hill, 1966).

Kahan, Théo

1959 Sur les Origines de la théorie de la relativité restreinte, *Rev. Hist. Scis.*, *13*, 159 165 (1959).

Kangro, Hans

1976 Wien, Wilhelm Carl Werner Otto Franz, in *Dictionary of Scientific Biography* (C. C. Gillispie, ed.) XIV (New York: Scribner, 1976), pp. 337-342.

Kittel, Charles

1974 Larmor and the Prehistory of the Lorentz Transformations, *Am. J. Phys.*, *42*, 726–729 (1974).

Klein, Martin J.

1962 Max Planck and the Beginnings of the Quantum Theory, *Arch. Hist. Exact Scis.*, *1*, 459–479 (1962).

1963 Planck, Entropy, and Quanta, 1901 1906, *The Natural Philosopher* (New York: Blaisdell), *1*, 83–108 (1963).

1964 Einstein and the Wave-Particle Duality, *The Natural Philosopher* (New York: Blaisdell) *3*, 3 49 (1964).

1965 Einstein, Specific Heats and the Early Quantum Theory, *Science*, *148*, 173–180 (1965).

1967 Thermodynamics in Einstein's Thought, *Science*, *157*, 509–516 (1967).

1970 *Paul Ehrenfest: vol. 1, The Making of a Theoretical Physicist* (Amsterdam: North-Holland, 1970).

1972 Mechanical Explanation at the End of the Nineteenth Century, *Centaurus*, *17*, 58–82 (1972).

1975 Einstein on Scientific Revolutions, *Vistas in Astron.*, *17*, 114–120 (1975).

1977 Some Unnoticed Publications by Einstein, *ISIS*, *68*, 601–604 (1977). With A. Needell.

Kollros, Louis

1956 Albert Einstein en Suisse Souvenirs, in *Jubilee of Relativity Theory* (Basel: Birkhäuser-Verlag, 1956), pp. 271–281.

von Kossel, W.

1947 Walter Kaufmann, *Naturwissenschaften*, *34*, 33–34 (1947).

Kuhn, Thomas S.

1978 *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894–1912* (Oxford: Oxford University Press, 1978).

Lebon, Ernest

1912 *Savants du Jour: Henri Poincaré* (2nd ed.; Paris: Gauthier-Villars, 1912).

Marder, L.

1971 *Time and the Space Traveller* (Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 1971).

McCormmach, Russell

1967 Hertz, Heinrich Rudolf, in *Dictionary of Scientific Biography* (C. C. Gillispie, ed.) (New York: Scribner, 1972), IV, pp. 340–350.

1970a H. A. Lorentz and the Electromagnetic View of Nature, *ISIS*, *58*, 37–55 (1970).

1970b Einstein, Lorentz and the Electromagnetic View of Nature, *Hist. Studies Phys. Scis.*, *2*, 41–87 (1970).

1973 Lorentz, H. A., in *Dictionary of Scientific Biography* (C. C. Gillispie, ed.) (New York: Scribner, 1973), VIII, pp. 487–500.

1976 Editor's Foreword, in *Hist. Studies Phys. Scis.*, *7*, xi-xxxv (1976).

Merz, John Theodore
1965 *A History of European Scientific Thought in the Nineteenth Century* (4 vols., 1904–1912: New York: Dover, 1965) and vols. 3 and 4 of this set are entitled, *A History of European Thought in the Nineteenth Century*.

Miller, Arthur I.
1973 A Study of Henri Poincaré's "Sur la Dynamique de l'Electron", *Arch. Hist. Exact Scis.*, *10*, 207-328 (1973).
1974 On Lorentz's Methodology, *Brit. J. Philos. Sci.*, *25*, 29–45 (1974).
1975a Book review of Adolf Grünbaum's, *The Philosophical Problems of Space and Time*, *ISIS*, *66*, 590–594 (1975).
1975b Albert Einstein and Max Wertheimer: A Gestalt Psychologist's View of the Genesis of Special Relativity Theory, *History of Science*, *13*, 75-103 (1975).
1976 On Einstein. Light Quanta, Radiation and Relativity in 1905, *Am. J. Phys.*, *44*, 912–923 (1976).
1977a Reply to Adolf Grünbaum's 'Remarks on Arthur I. Miller's Review of *Philosophical Problems of Space and Time*', *ISIS*, *68*, 449–450 (1977).
1977b On Unipolar Dynamos, The Electrical Industry and Relativity Theory. Lecture presented on 27 April 1977 at the *Technology Studies Seminar Series*, Massachusetts Institute of Technology. Scheduled to appear in *Ann. Sci.*
1977c The Physics of Einstein's Relativity Paper of 1905 and the Electromagnetic World-Picture of 1905, *Am. J. Phys.*, *45*, 1040 1048 (1977).
1978a Visualization Lost and Regained: The Genesis of the Quantum Theory in the Period 1913 1927, in *On Aesthetics in Science* (J. Wechsler, ed.) (Cambridge, MA.: MIT Press, 1978), pp. 72–102.
1978b Reply to 'Some New Aspects of Relativity: Comments on Zahar's Paper', *Brit. J. Philos. Sci.*, *29*, 252 256 (1978).
1979a On Some Other Approaches to Electrodynamics in 1905. Lecture presented on 5 March 1979 at the Einstein Centennial Celebration, the Institute for Advanced Study, 4–9 March 1979. Scheduled to appear in the *Proceedings*.
1979b Poincaré and Einstein: A Comparative Study. Scheduled to appear in vol. XXXI of the *Boston Studies Philos. Sci.*
1979c The Special Relativity Theory: Einstein's Response to the Physics of 1905. Lecture presented on 14 March 1979 at the Einstein Centennial Symposium in Jerusalem, Israel, 14 23 March 1979. Scheduled to appear in the *Proceedings*.

Møller, C.
1972 *The Theory of Relativity* (Oxford: Oxford University Press, 1952; 2nd enlarged ed., 1972).

Nye, Mary Jo
1972 *Molecular Reality: A Perspective on the Scientific Work of Jean Perrin* (New York: Elsevier, 1972).

Panofsky, Wolfgang and Melba Phillips
1961 *Classical Electricity and Magnetism* (Reading: Addison-Wesley, 1961).

Prokhovnik, S. J.
1967 *The Logic of Special Relativity* (Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1967).

Purcell, Edward M.
1975 *Electricity and Magnetism: Berkeley Physics Course* (New York: McGraw-Hill, 1975).

Pyenson, Lewis
1977 Hermann Minkowski and Einstein's Special Theory of Relativity, *Arch. Hist. Exact Scis.*, *17*, 71–95 (1977).

Lord Rayleigh [J. W. Strutt]
1942 *Sir J. J. Thomson* (Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1942).

Reichenbach, Hans
1958 *The Philosophy of Space and Time* (New York: Dover, 1958), translated by M. Reichenbach and J. Freund.

1969 *Axiomatization of the Theory of Relativity* (Berkeley: University of California Press, 1969), translated and edited by M. Reichenbach.
Reid, Constance
1970 *Hilbert* (New York: Springer, 1970).
Reiser, Anton
1930 *Albert Einstein, A Biographical Portrait* (New York: A & C Boni, 1930).
Resnick, Robert
1968 *Introduction to Special Relativity* (New York: Wiley, 1968).
1978 *Physics* (2 vols.; New York: Wiley, 1978). With D. Halliday.
Robertson, Howard P.
1949 Postulate versus Observation in the Special Theory of Relativity, *Rev. Mod. Phys.*, *21*, 378 382 (1949).
Röhrlich, Fritz
1965 *Classical Charged Particles* (Reading, MA.: Addison-Wesley, 1965).
Rosenfeld, Léon
1952 The Velocity of Light and the Evolution of Electrodynamics, *Nuovo Cimento*, *4*, 1630 1669 (1957).
Rosser, W. G. V.
1964 *An Introduction to the Theory of Relativity* (London: Butterworths, 1964).
Rossi, Bruno and D. B. Hall
1941 Rate of Decay of Mesotrons with Momentum, *Phys. Rev.*, *59*, 223 228 (1941).
Salmon, W. C.
1975 *Space, Time and Motion: A Philosophical Introduction* (Encino, CA: Dickenson, 1975)
Sauter, Joseph
1965 *Erinnerungen an Albert Einstein*. This phamphlet (unpaginated) was published in 1965 by the Patent Office in Bern, and contains documents pertaining to Einstein's years at that office as well as a note by Sauter.
Schaffner, Kenneth
1969 The Lorentz Theory of Relativity, *Am. J. Phys.*, *37*, 498 513 (1969).
1972 *Nineteenth-Century Aether Theories* (New York: Pergamon, 1972).
Schiff, Leonard I.
1939 A Question in General Relativity, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, *25*, 391 395 (1939).
Schlomka, T. and G. Schenkel
1949 Relativitätstheorie und Unipolarinduktion, *Ann. Phys.*, *5*, 57 62 (1949).
Seelig, Carl
1952 *Albert Einstein und die Schweiz* (Zürich: Europa-Verlag, 1952).
1954 *Albert Einstein: Eine dokumentarische Biographie* (Zürich: Europa-Verlag, 1954).
Shankland, Robert S.
1963 Conversations with Albert Einstein, *Am. J. Phys.*, *31*, 47-57 (1963).
1964 The Michelson-Morley Experiment, *Sci. Am.*, November (1964), pp. 107 114.
Siegel Daniel
1978 Classical-Electromagnetic and Relativistic Approaches to the Problem of Nonintegral Atomic Masses, *Hist. Studies Phys. Scis.*, *9*, 323-360 (1978).
Siemens, Georg
1957 *History of the House of Siemens*, (2 vols.; Munich: Alber, 1957), translated by A. F. Rodger.
Süsskind, Charles
1972 Heaviside, Oliver, in *Dictionary of Scientific Biography* (C. C. Gillispie, ed.) VI (New York: Scribner, 1972), pp. 211-212.
Swenson, Loyd, Jr.
1972 *The Ethereal Aether* (Austin: University of Texas Press, 1972).
Terrell, James
1959 Invisibility of the Lorentz Contraction, *Phys. Rev.*, *116*, 1041 1045 (1959).

Teske, A. A.
1975 Smoluchowski, Marian, in *Dictionary of Scientific Biography* (C. C. Gillispie, ed.) (New York: Scribner, 1975). XII, pp. 496–498.
Tonnelat, Marie-Antoinette
1971 *Histoire du principe de relativité* (Paris: Flammarion, 1971).
Toulmin, Stephen
1970 *Physical Reality* (S. Toulmin, ed.). (New York: Harper Torchbooks, 1970).
Weidener, R. T. and R. L. Sells
1975 *Elementary Physics, Classical and Modern* (Boston: Allyn and Bacon, 1975).
Weill-Brunschvicg, Adrienne
1973 Langevin, Paul, in *Dictionary of Scientific Biography* (C. C. Gillispie, ed.) VIII (New York: Scribner, 1973), pp. 9 14.
Weinberg, Steven
1972 *Gravitation and Cosmology* (New York: Wiley, 1972).
Weinstein, Roy
1960 Observation of Length by a Single Observer, *Am. J. Phys.*, *28*, 607 610 (1960).
Weiss, Pierre
1912 Prof. Dr. Heinrich Friedr. Weber, 1843 1912, *Schweizerische Naturf. Ges. Verh.*, *95*, 44 53 (1912).
Weisskopf, Victor F.
1960 The Visual Appearance of Rapidly Moving Objects, *Phys. Today*, *13*, 24-27 (1960).
Wertheimer, Max
1959 *Productive Thinking* (1st ed., New York: Harper, 1945; enlarged ed., 1959).
Whitrow, Gerald J.
1961 *The Natural Philosophy of Time* (London: Nelson, 1961).
Whittaker, Sir Edmund
1973 *A History of the Theories of Aether and Electricity* (vol. 1, London: Nelson, 1910, revised and enlarged edition, 1953; vol. 2, London: Nelson, 1953, 2 vols.: reprinted by New York: Humanities Press, 1973).
Williams, L. Pearce
1971 *Michael Faraday: A Biography* (New York: Basic Books, 1971).
Winnie, J. A.
1970 Special Relativity without one-way velocity assumptions, *Philos. Sci.*, *37*, 81–99; II, 223-2.3 (1970).
1972 The Twin-Rod Thought Experiment, *Am. J. Phys.*, *40*, 1091 1094 (1972).
Woodruff, Arthur E.
1968 The Contributions of Hermann von Helmholtz to Electrodynamics, *ISIS*, *59*, 300-311 (1968).
Yildiz, Asim
1966 Electromagnetic Cavity Resonances in Accelerated Systems, *Phys. Rev.*, *146*, 947-954 (1966). With C. H. Tang, II, *Nuovo Cimento*, *61*, 1 – 11 (1969).

□

ب) مراجعُ مُخْتَارةٌ

□ بالإنكليزيّة

Aichelburg, P.C. and R.U. Sexl, eds.

1979 *Albert Einstien: His Influence on Physics, Philosophy and Politics* (Braunschweig/Wiesbaden; Vieweg, 1979). Published under the auspices of the "International Society on General Relativity and Gravitation".

Atwater, H.A.

1974 *Intrduction to General Relativity* (Oxford: Pergmon, 1974).

Born, Max

1971 *The Born-Einstein Letters*: The Corrspondence between Max & Hedwig Born and Albert Einstein 1916/1955 (London: MacMillan, 1971). Commentaries: Max Born. Translation: Irene Born. Introduction: Werner Heisenberg. Foreword: Bertrand Russell.

Clark, Ronald W.

1973 *Einstein: The Life and Times* (London: Hodder and Stoughton, 1973). Introduction by Sir Bernard Lovell.

Einstein, Albert and Leopold Infeld

1961 *The Evolution of Physics*, (Cambridge, U.K.: The University Press, 1961).

Epstein, Lewis Carroll

1985 *Relativity Visualized* (San Francisco: Insight Press, 1985).

French, Anthony P., ed.

1979 *Einstien: A Centenary Volume* (London: Heinemann, for the International Commission on Physics Education, 1979).

Geroch, Robert
1978 *General Relativity from A to B* (Chicago: The University of Chicago Press, 1978).

Hoffmann, Banesh
1983 *Relativity and its Roots* (New York: Freeman/Scientific American Books, 1983).

Holton, Gerald, ed.
1963 *Selected Reprints in Special Relativity Theory* (New York: American Institute of Physics, 1963).

Kenyon, I.R.
1990 *General Relativity* (Oxford: Oxford University Press, 1990).

Landsberg, P.T., ed.
1982 *The Enigma of Time* (Bristol: Adam Hilger, 1982).

McCormmach, Russell
1982 *Night Thoughts of a Classical Physicist* (New York: Avon Books, 1982).

Mermin, N. David
1983 Relativistic Addition of Velocities Directly from the Constancy of the Velocity of Light, *Am. J. Phys.*, **51**, 1130-1131 (1983).
1984 Relativity Without Light, *Am. J. Phys.*, **52**, 119-124 (1984).

Misner, Charles W., Kip S. Thorne, and John Archibald Wheeler
1973 *Gravitation*, (San Francisco: Freeman, 1973).

Narlikar, Jayant V.
1982 *The Lighter Side of Gravity* (New York: Freeman, 1982).

Pais, Abraham
1982 *'Subtle in the Lord...': The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982).

Pathria, R.K.

1974 *The Theory of Relativity* (2nd ed.; Oxford: Pergamon, 1974).

Pyenson, Lewis

1985 *The Young Einstein: The Advent of Relativity* (Bristol: Adam Hilger, 1985).

Ray, Christopher

1987 *The Evolution of Relativity* (Bristol: Adam Hilger, 1987).

Reichenbach, Hans

1980 *From Copernicus to Einstein* (New York: Dover, 1980), translated by Ralph B. Winn.

Rindler, Wolfgang

1987 *Introduction to Special Relativity* (Oxford: Clarendon Press, 1987).

Rucker, Rudolf v.B.

1977 *Geometry, Relativity and the Fourth Dimension* (New York: Dover, 1977).

1980 *Speculations on the Fourth Dimension: Selected Writings of Charles H. Hinton* (New York: Dover, 1980).

Schwinger, Julian

1986 *Einstein's Legacy: The Unity of Space and Time* (New York: Scientific American Books, 1986).

Smith, J.H.

1967 *Introduction to Special Relativity* (New York: Benjamin, 1967).

Taylor, Edwin F. And John Archibald Wheeler

1966 *Spacetime Physics* (San Francisco: Freeman, 1966).

Wild, Robert M.

1984 *General Relativity* (Chicago: The University of Chicago Press, 1984).

□ بالعربيّـة

آينشْتايْن ، ألبرت

د . ت . النّسْبيّـة : النّظريّـةُ الخاصّةُ والعامّة . ترجمة : رمسيس شحاتة . مراجعة : محمّد مرْسي محمّد (القاهرة : دار نهضةِ مصر ؛ د .ت .) .

١٩٨٥ هكذا أرى العالَم . ترجمة : أدهم السّمّان (دمشق : وزارة الثّقافة ؛ ١٩٨٥) .

١٩٨٦ أفكار وآراء . ترجمة : رمسيس شحاتة (القاهرة : الهيئةُ المصريّة للكتاب ؛ ١٩٨٦) .

١٩٨٧ معنى النّسْبيّة . ترجمة : علي يوسف فَرَح (الزّرقاء : مكتبة المنار ؛ ١٩٨٧) .

پوانكاري ، هنري

١٩٨٢ قيمة العِلْم . ترجمة : الميلُودي شَغْموم (بيْروت : دارُ التّنْوير ؛ ١٩٨٢) .

رَسِل ، برتْراند

١٩٨٦ ألف باء النّسْبيّة . ترجمة : فؤاد كامل (بَغْداد : دار الشّؤونِ الثّقافيّة ؛ ١٩٨٦) .

الطّائي ، محمّد باسل جاسم

١٩٨٤ مدْخَل إلى النّظريّـة النّسْبيّـةِ الخاصّةِ والعامّة (الموصل : مؤسّسة دارِ الكتب ؛ ١٩٨٤) .

غَصِيب ، هشام

١٩٨٢ مدْخَلٌ مُبَسّطٌ إلى مَنْطِقِ النّسْبيّـةِ الخاصّةِ (عمّان : الجمعيّةُ العِلْميّـةُ المَلَكيّة ؛ ١٩٨٢) .

١٩٨٨ الطّريقُ إلى النّسْبيّـةِ من كُوبِرْنيكُوس إلى آيْنشتـايْن (عمّان : الجمعيّةُ العِلْميّـةُ المَلَكيّة ؛ ١٩٨٨) .

لانْدَاو ، ليف داڤيدوڤيتْش ويُوري رُومِر

١٩٧٤ ما هي نظريّـةُ النّسْبيّـة؟ (موسكو : دار مير ؛ الطّبعة الثّالثة ، ١٩٧٤) .

□

□ [إضافـةً إلى الثّروةِ الزّاخرةِ التي يُمْكِنُ الحُصُولُ عليها عن طريقِ الإنترنت. انظر، مثلاً: amazon. com.]

□



علوم

2008

أ. د. همام غصيب

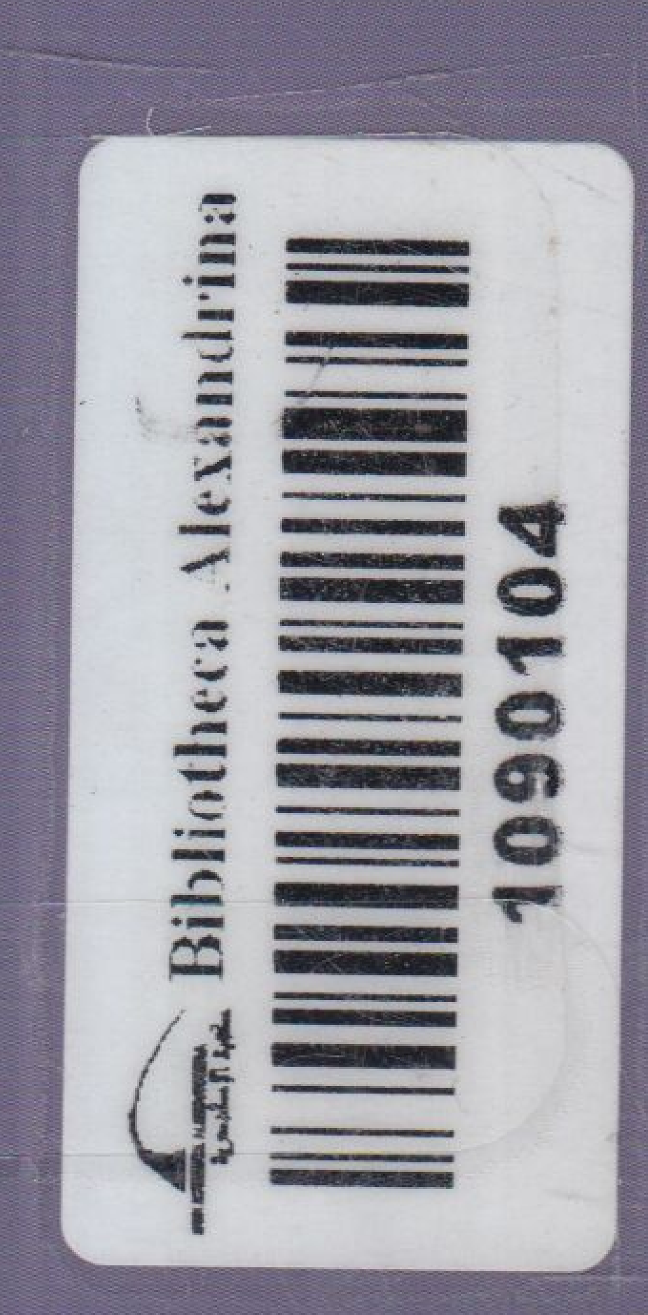
السّندباد الفيزيائيّ ونسبيّة آنشتاين

يأتي مشروع مكتبة الأسرة الأردنية ومهرجان القراءة للجميع، بهدف توفير طبعة شعبية زهيدة الثمن تكون في مقدور محبّي الثقافة من أبناء الأسرة الأردنية.

وهذا المشروع هو ترجمة لهدف نبيل يتمثل في تعميم الثقافة والمعرفة، ونشرها، وربط الأجيال بالتراث الثقافي والحضاري للأمة، والتواصل مع الثقافات الإنسانية.

فالكتاب هو مصدر الثقافة، التي هي سلاحنا الأمضى، وهو حامل رسالتنا التنويرية، ونحن نواكب عصر المعلوماتية.

ولهذا تباينت هذه الإصدارات في موضوعاتها ومضامينها، واتجاهاتها ورؤاها، لتقدم للقارئ زاداً معرفياً متكاملاً، ولتلبي رغبات وحاجات مختلف الشرائح.



وزارة الثقافة - شارع وصفي التل
عمان / الأردن، ص.ب: ٦١٤٠
هاتف: ٥٦٩٦٢١٨، ٥٦٩٦٥٨٨، ٥٦٩٧٦٨٧، ٤٦٠٧٣٥٩
فاكس: ٥٦٩٦٥٩٨



السعر: (٣٥) قرشاً